LES CONDITIONS MÉTÉOROLOGIQUES AFFECTANT LE NIVEAU D'EAU DU LAC SAINT-JEAN

Préparé pour:

Société d'Électrolyse et de Chimie Alcan Ltée
Service de l'Environnement Atmosphérique, Environnement Canada

Contrat nº: 16SD.KM351-8-S102

Préparé par:
SAGIE, géographes-conseils.

Avril 1989

SOMMAIRE EXÉCUTIF

Cette étude a examiné les conditions atmosphériques qui traduisent des dénivellations importantes de la surface du lac Saint-Jean et qui constituent le processus de formation d'un phénomène oscillatoire désigné par le terme **"seiche"**. L'étude a utilisé les données de niveaux d'eau de la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée mesurées aux stations hydrométriques de Roberval, Saint-Henri et Saint-Gédéon. Les données météorologiques ont été fournies par le Service de l'Environnement Atmosphérique (SEA), région du Québec, d'Environnement Canada.

L'étude montre que :

a) Le lac Saint-Jean est occasionnellement animé par d'importants et lents mouvements d'élévation et de baisse concomitants qui donnent des dénivellations pouvant atteindre 21 cm dans l'axe est ouest, d'une rive à l'autre.

b) Ces dénivellations sont produites par des vents forts et persistants. La direction des vents détermine l'orientation de la dénivellation du plan d'eau, alors que la vitesse fixe l'ampleur de l'événement, soit les hauteurs de dénivellation. Le seuil de vitesse requis pour initier le phénomène semble être situé autour de 15 km/h.

c) Malgré l'impossibilité d'établir une mesure directe, à cause de la position géographique des stations hydrométriques, l'analyse de certaines données laisse présumer l'existence de dénivellations peut être plus importantes encore dans l'axe sud-est nord-ouest.

d) Depuis 1981, il se produit environ deux dénivellations supérieures ou égales à 15 cm par année.

e) Ces dénivellations s'observent quelques fois au printemps mais principalement à la fin de l'été et à l'automne, et durent généralement moins d'une journée.

f) Il est impossible d'évaluer l'activité des seiches du lac Saint-Jean à l'aide de données hydrométriques mesurées aux quatre heures puisque, pour un lac de dimensions semblables, la période d'oscillation des seiches est de une à deux heures.

Par ailleurs, des considérations hypothétiques et certaines de nos observations analytiques laissent entendre que la localisation des stations hydrométriques ne permet pas toujours de traduire le com-

portement réel de la surface du lac. Le niveau d'eau moyen établi à l'aide d'une moyenne des données des trois stations serait surestimé à plusieurs moments de la période estivale. Ce problème pourrait toutefois être surmonté en exploitant une notion de proximité à la ligne nodale ("equilibrium axis method"), si, bien sûr, la position de ces lignes est connue.

En vu d'une amélioration de la connaissance du comportement du niveau d'eau du lac Saint-Jean, nous faisons les recommandations suivantes:

i) Ajouter des points d'échantillonnage (stations) au pourtour du lac afin de considérer d'autres axes d'oscillations que ceux considérés par les trois stations existantes. Au minimum, une station devrait être ajoutée dans le secteur au nord-ouest afin d'évaluer les dénivellations dans l'axe sud-est nord-ouest.

ii) Établir une procédure d'échantillonnage (mesure du niveau d'eau) au 15 ou 30 minutes afin de capter les oscillations du lac.

iii) Développer une méthode objective (mécanisée ou non) pour la validation des niveaux d'eau mesurés; une méthode qui doit considérer et mettre en relation les visites d'entretien des stations hydrométriques, le comportement des niveaux d'eau et l'état des vents (vitesse, direction et persistance).

iv) Tenter de simuler les dénivellations à l'aide de modèles numériques existants, et évaluer leur performance; ceci afin d'établir une procédure de gestion qui serait basée sur des prévisions. La simulation devrait considérer: la bathymétrie, les débits d'entrée et de sortie d'eau au lac, et la variabilité des vents sur le lac.

EXECUTIVE SUMMARY

The purpose of this study is to examine, for lake Saint-Jean, the oscillation movement called "seiche" originating from important water level changes due to particular atmospheric conditions. Regional meteorological data were obtained from Atmospheric Environment Service, Environment Canada. Water level measurements data were collected at hydrometric stations located at Roberval, Saint-Henri and Saint-Gédéon, and were obtained from Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée.

The study shows that,

a) The stretch of water of lake Saint-Jean occasionnally present concomitant water level decline and raising which lead to unevenness up to 21 cm, from shore to shore, in the east-west line.

b) Those unevennesses are generated by strong and persistent winds. Wind direction determines the orientation of the stretch of water unevenness, as its speed is responsible for the height of the water level change. Minimum wind speed required to create the phenomena is 15 km/h.

c) Despite the impossibility to establish a direct measure of it, because of the geographical position of actual hydrometric stations, data analysis lets presume more important unevennesses in the southeast-northwest line.

d) Since 1981, unevennesses equal or superior to 15 cm are observed about twice a year.

e) Although major influences are sometimes observed in spring, they generally occur in the late summer and fall, and last less than a day.

f) Finally, the "seiche" activity is hardly detected by the mean of hydrometric data collected on a four hours period, as for a lake of that size, oscillation period ranges from a one to two hours period.

In another way, hypothetical considerations and analytical observations let presume that hydrometric stations position do not permit a real water movement interpretation. The water level mean resulting from a mean of three stations data frequently presents overestimation in summertime. This situation should be corrected by a proximity notion to the nodal line (equilibrium axis method),

as far as this one is correctly known.

In order to improve the knowledge of water level variation of lake Saint-Jean, following recommendations are proposed:

i) The adding of sampling stations around the lake should permit the consideration of oscillation lines different than those determined from existing stations. At least one new station should be installed in northwest area to permit the evaluation of unevenness in the southeast-northeast line.

ii) A change in sampling measurement (water level) strategy to 15-30 minutes period should bring a better knowledge of real oscillations of the stretch of water.

iii) The development of an objective methodology (mechanized or not) in order to increase the validity of water level measurements; this methodology should consider and relate the followings: maintenance visits to hydrometric stations, water level variations and wind activity (speed, direction and persistency).

iv) The application of existing numerical computer models to simulate unevenness, and their evaluation, in order to establish a management based on forecastings. This simulation model should include following aspects: bathymetry, input and output flows, and wind variability on the lake.

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce document a été soutenue financièrement par la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée, et par le Service de l'Environnement Atmosphérique, d'Environnement Canada. Nous les remerçions.

Plus particulièrement, nous tenons à remercier les personnes suivantes:

Gilles Lalumière, ing.	**Alcan Ltée**
Claude Gignac, ing.	**Alcan Ltée**
Paul Simard, tech.	**Alcan Ltée**
Gérald Vigeant, météor.	**SEA, Env. Canada**
Michel Jean, météor.	**SEA, Env. Canada**

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE EXÉCUTIF i

EXECUTIVE SUMMARY iii

REMERCIEMENTS v

TABLE DES MATIÈRES vi

LISTE DES FIGURES vii

LISTE DES TABLEAUX ix

1. INTRODUCTION 1
   1.1 Les caractéristiques morphométriques du lac 2

2. ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES 4
   2.1 L'aspect conceptuel 5
   2.2 L'origine des seiches de surface 9
      2.2.1 L'effet du vent 9
      2.2.2 L'effet de la pression atmosphérique 11

3. MÉTHODOLOGIE 13
   3.1 Les données 13
      3.1.1 Les données hydrométriques 14
      3.1.2 Les données météorologiques 16
   3.2 La procédure d'analyse 17

4. RÉSULTATS 19
   4.1 Les seiches du lac Saint-Jean 19
   4.2 Les effets atmosphériques 29
      4.2.1 La pression 29
      4.2.2 Les vents 29

5. CONCLUSION 44

6. RECOMMANDATIONS 49

RÉFÉRENCES 50

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Carte bathymétrique du lac Saint-Jean. 3

Figure 2.1 Illustration schématique d'une seiche uninodale. 6

Figure 2.2 Effet du vent sur un plan d'eau.. 10

Figure 3.1 Stations hydrométriques et anémométriques au lac Saint-Jean. 15

Figure 4.1 Écarts absolus de niveaux d'eau entre les stations hydrométriques, année 1987. 21

Figure 4.2 Nombre de jours avec des écarts de niveau d'eau supérieurs ou égaux à 15 cm. 22

Figure 4.3 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, septembre et octobre 1981. 25

Figure 4.4 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, Déc. 1982. . . 25

Figure 4.5 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, août 1983. . . 26

Figure 4.6 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, octobre 1983. 26

Figure 4.7 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, nov. 1986. . . 27

Figure 4.8 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, Août 1987. . . 27

Figure 4.9 Vents et écarts de niveau d'eau, nov. 1982. . . 31

Figure 4.10 Vents et écarts de niveau d'eau, déc. 1982. . . 32

Figure 4.11 Vents et écarts de niveau d'eau, mai 1983. . . . 33

Figure 4.12 Vents et écarts de niveau d'eau, nov. 1983. . . 34

Figure 4.13 Vents et écarts de niveau d'eau, octobre et novembre 1985. 35

Figure 4.14 Vents et écarts de niveau d'eau, nov. 1986. . . 36

Figure 4.15 Variabilité des vents au lac Saint-Jean, octobre et novembre 1985. 41

Figure 4.16 Variabilité des vents au lac Saint-Jean, novembre 1986. 42

Figure 4.17 Variabilité des vents au lac Saint-Jean, avril 1987. 43

Figure 5.1 Aires de localisation présumées des lignes nodales. 46

Figure 5.2 Fréquence de la vitesse des vents par direction; Roberval, 1er mai au 30 novembre, 1958 à 1987. 47

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Périodes d'oscillation des seiches de certains lacs. 8

Tableau 3.1 Fiche technique relative aux stations hydrométriques du lac Saint-Jean. 14

Tableau 4.1 Périodes d'oscillation des seiches établies à l'aide de l'équation 2.1. 20

Tableau 4.2 Écarts de niveau d'eau importants du lac Saint-Jean survenus entre le 1er janvier 1981 et le 31 juillet 1988 (données validées). 23

Tableau 4.3 Épisodes de seiches importantes du lac Saint-Jean. 24

Tableau 4.4 Certaines caractéristiques des seiches (dénivellations) importantes du lac Saint-Jean. 28

1. INTRODUCTION

L'exploitation d'un système hydroélectrique requiert une connaissance adéquate des apports non contrôlés réels qui arrivent aux réservoirs. Cette connaissance permet une calibration des modèles hydrologiques qui servent par la suite à établir les prévisions à court et moyen terme des apports non contrôlés. La fiabilité des prévisions repose en grande partie sur la qualité de cette connaissance des apports non contrôlés réels.

Les apports non contrôlés réels aux différents réservoirs du système hydroélectrique Alcan sont calculés par la méthode du bilan hydrique. Cette méthode considère la variation de l'emmagasinement du réservoir dont l'évaluation dépend des lectures de niveau d'eau enregistrées aux stations hydrométriques du réservoir.

Alcan utilise la moyenne arithmétique des mesures enregistrées à trois stations hydrométriques pour estimer le niveau moyen du lac Saint-Jean. Des dénivellations soudaines de la surface du plan d'eau viennent toutefois fausser l'estimation du niveau moyen du lac. Une meilleure compréhension du comportement de la surface du lac Saint-Jean pourrait permettre aux gestionnaires d'obtenir une meilleure estimation du niveau moyen du lac et, par le fait même, d'améliorer les prévisions des apports non contrôlés.

Dans cet ordre d'idées, nous avons procédé à une évaluation relationnelle de cause à effet afin d'identifier les conditions environnementales qui induisent les dénivellations. Il s'agit d'une étude quasi expérimentale (variables non contrôlées par le chercheur) qui a pour objet l'examen des dénivellations importantes mises en relation avec les conditions environnementales contemporaines.

Plus précisément, l'étude s'intéresse au phénomène d'oscillation apériodique et lent causé par des événements météorologiques. Ce phénomène est identifié par l'appellation "seiche" (AQTE et OLF, 1981). Le terme seiche fut à l'origine utilisé pour exprimer un mouvement oscillatoire d'élévation et de baisse de la surface d'un réservoir lacustre ou d'une partie de celui-ci. Depuis, l'usage de ce terme a été étendu à l'étude des eaux stratifiées pour exprimer un tel mouvement sous la surface (Hutchinson,1975). Il y a donc les seiches de surface et les seiches internes. Notre étude ne s'intéresse qu'aux seiches de surface.

L'objectif de l'étude est de fournir aux gestionnaires une meilleure connaissance sur la formation de seiches au lac Saint-Jean et sur les variations spatiales du niveau d'eau.

1.1 Les caractéristiques morphométriques du lac

Le lac Saint-Jean est orienté sud-est nord-ouest et s'étale approximativement sur une longueur de 44 km par une largeur de 24 km. Le périmètre du plan d'eau totalise une distance d'environ 210 km, et la superficie est de l'ordre de 1058,6 km^2. L'élévation maximale du niveau d'eau est de 101,84 m au-dessus du niveau moyen des mers.

La bathymétrie du lac Saint-Jean est caractérisée par une dépression de dimension horizontale restreinte, mais profonde, par rapport à l'ensemble du lac, dans la partie sud-est (figure 1.1). La profondeur maximale est de 68,1 m. Les plus grandes superficies de faible profondeur (inférieure à 10 m) se localisent principalement au nord-ouest, au sud-ouest (secteur de Roberval), et au nord-est (secteur de Saint-Henri).

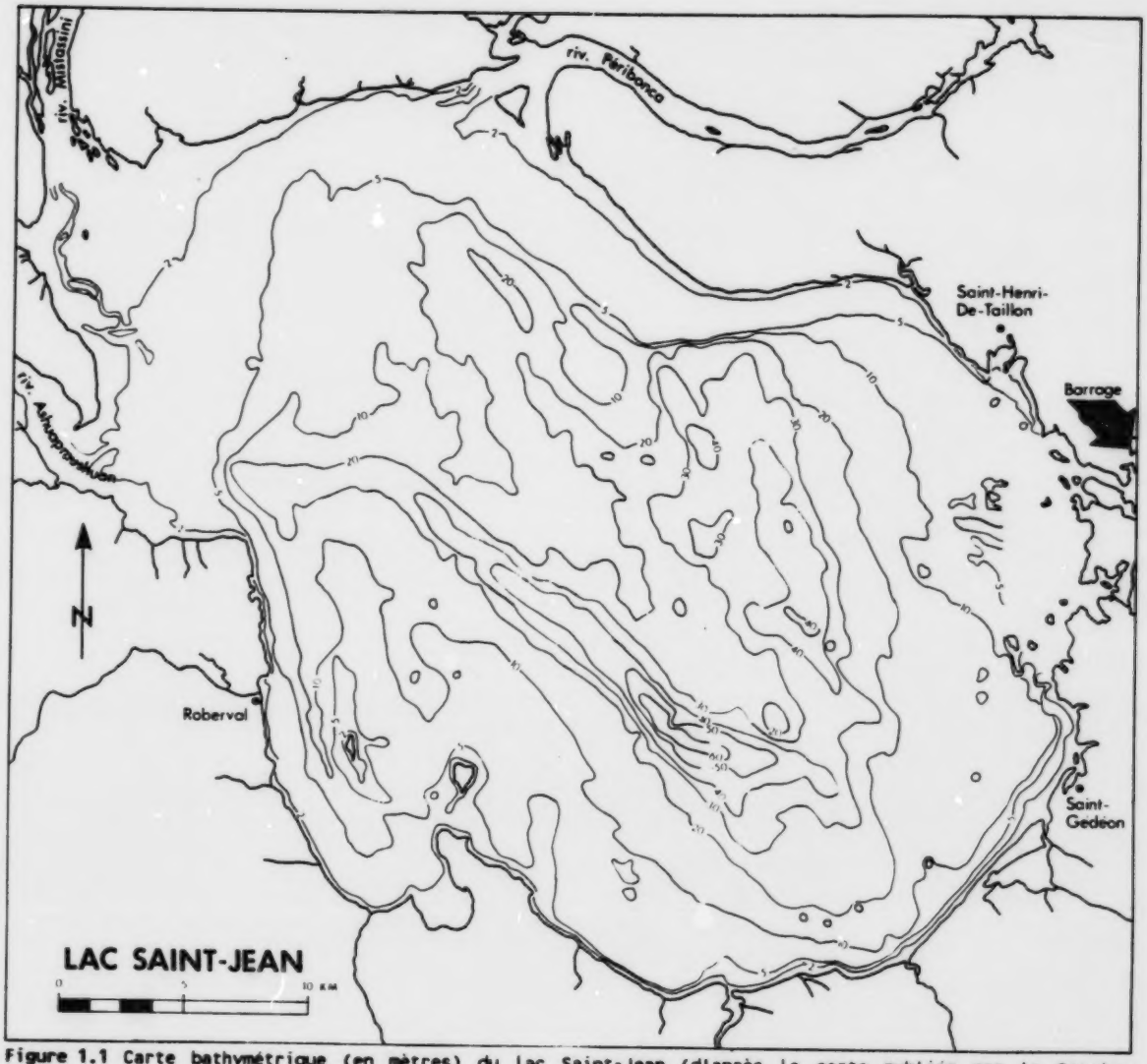

Figure 1.1 Carte bathymétrique (en mètres) du lac Saint-Jean (d'après la carte publiée par le Service Hydrographique du Canada, 1987).

2. ÉTAT ACTUEL DES CONNAISSANCES

Il est connu aujourd'hui que la dynamique des grandes masses d'eau est conséquente des effets conjugués des forces d'attraction planétaire (terre, soleil, lune), de la rotation de la terre (force de Coriolis), des gradients présents dans la masse d'eau (pression, salinité, température, densité, pente, etc.), de la profondeur et de la forme des fonds, de la configuration des côtes ou des rives et de la structure de la masse d'eau (stratification thermique ou de densité). Il est également connu que la dynamique des masses d'eau, grandes et petites, est fortement influencée par la trajectoire des perturbations atmosphériques et la durée des événements météorologiques (Wells, 1986).

Il existe en effet une relation évidente entre le mouvement des masses d'eau et les conditions atmosphériques qui ont prévalu. La pression atmosphérique et le vent sont les paramètres météorologiques dominants dans cette relation.

L'étude de l'hydrodynamique des masses d'eau passe bien sûr par la discipline de l'océanographie. Toutefois, quand il s'agit d'étendues lacustres, il est préférable de parler de limnologie. La limnologie est un terme qui a été introduit par F.A. Forel dans son traité "Le Léman: Monographie limnologique" (1892, 1895 et 1904; voir Mortimer, 1979) pour représenter une sous-discipline de l'océanographie. Cette distinction est très importante puisque l'hydrodynamique lacustre diffère grandement de celle des vastes mers. L'hydrodynamique lacustre est bien entendu soumise aux mêmes éléments mentionnés auparavant, mais à des degrés différents; les éléments "profondeur et forme des fonds" et "configuration des côtes ou des rives" interviennent beaucoup plus dans cette dynamique, alors que l'élément "force d'attraction planétaire" n'a pratiquement pas d'effet (Murty, 1984). Etant donné l'objet de

notre étude, la suite de notre discussion ne s'intéresse qu'à la limnologie.

Le premier auteur à avoir considéré le problème des seiches de surface et à avoir établi une relation avec les conditions météorologiques fut probablement Vaucher (1833; voir Hutchinson, 1975). Toutefois, l'étude scientifique de ce phénomène a réellement débuté avec les travaux de F.A. Forel ("Le Léman" 1892-1904; voir Mortimer, 1979), et les bases théoriques furent traitées pour la première fois dans les travaux de G. Chrystal (1904, 1905a, b, 1908; voir Hutchinson, 1975). Plusieurs auteurs se sont depuis intéressés au sujet et ont contribué à l'avancement de la théorie des seiches de surface.

Nous présentons ici une revue non exhaustive des connaissances accumulées en ce qui concerne le phénomène de seiches de surface. Nous référons ceux qui aimeraient approfondir le sujet aux ouvrages suivants: L.J. TISON et al (1969), C.H. MORTIMER (1974), G.E. HUTCHINSON (1975), UNESCO (1981), CENTREAU (1983) et T.S. MURTY (1984).

2.1 L'aspect conceptuel

Sur le plan conceptuel, une seiche est un événement oscillatoire amorcé par une force extérieure non permanente et apériodique qui se traduit par un mouvement simultané d'élévation d'une masse d'eau sur une partie d'un réservoir et de baisse sur une partie opposée (figure 2.1). Partant de cela, il existe un lieu entre les extrémités qui n'est pas soumis au mouvement vertical. Ce lieu est le noeud de l'événement qui, physiquement, peut être une ligne transversale au mouvement d'ensemble — dans ce cas on parle de ligne nodale — ou un point autour duquel se produit un mouvement vertical — dans ce dernier cas on parle de point nodal —. La

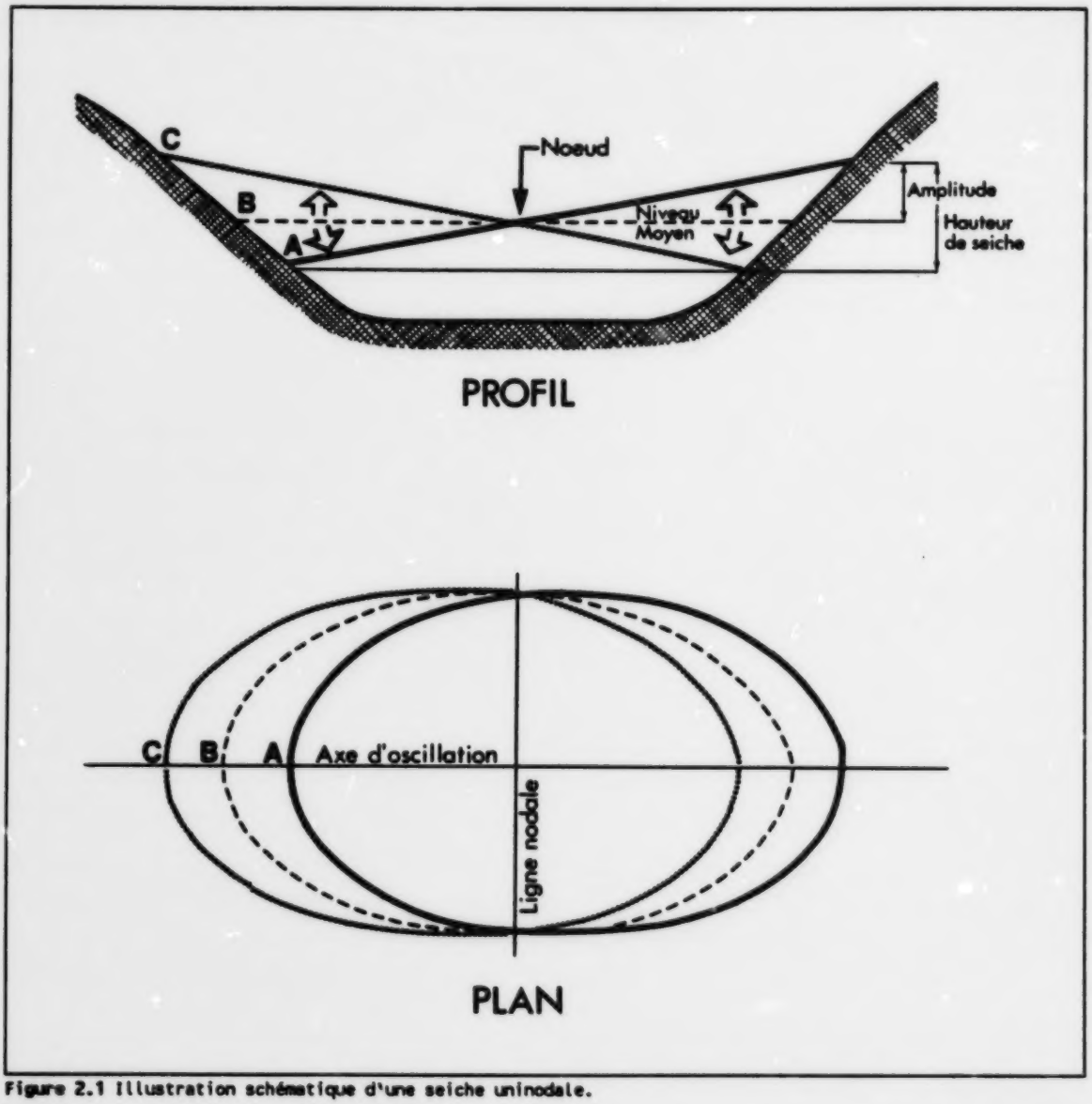

Figure 2.1 Illustration schématique d'une seiche uninodale.

différence de niveau entre les extrémités du mouvement d'ensemble est la hauteur de seiche. L'amplitude est la demi-hauteur de seiche. Un mouvement d'oscillation s'amorce autour de la ligne nodale ou du point nodal dès que la force extérieure diminue considérablement ou cesse. Pour un lieu autre que le noeud, l'oscillation traduit un mouvement vertical périodique. Le temps qui s'écoule entre deux mouvements positifs maximaux (ou négatifs

minimaux) est la période de seiche. Si la force extérieure n'intervient pas à nouveau, l'amplitude de l'oscillation décroît avec le temps.

Il peut y avoir plus d'un noeud si la forme du réservoir où se produit un mouvement vertical présente certaines irrégularités, ou si les conditions atmosphériques du moment sont très variables à l'échelle du plan d'eau. Les noeuds tendent à se localiser dans les secteurs de hauts-fonds. De plus, un noeud localisé à proximité d'un haut-fond très proche de la surface peut déstabiliser la seiche, soit en augmentant le phénomène soit en l'atténuant.

Pour un lac allongé et d'une profondeur uniforme, la période de seiche (**T**) est proportionnelle à la longueur de l'axe d'oscillation (**L**)[1] (voir figure 2.1) et inversement proportionnelle à la profondeur (**P**) et au nombre de noeuds (**n**) (Bruce et Clark, 1966):

$$T = \frac{1}{n} \quad \frac{2L}{(gP)^{0.5}} \qquad \text{(éq. 2.1)}$$

où **g** est l'accélération due à la gravité.

Cependant, le profil bathymétrique intervient dans cette relation. Un profil bathymétrique concave tend à réduire les différences entre les périodes de seiche comportant un nombre différent de noeuds, alors qu'un profil convexe tend à les augmenter. La forme des rivages ou du pourtour du réservoir considéré est également un facteur de variabilité. (Mortimer, 1974, Murty, 1984.)

Selon le recensement de Wilson (1972, voir Murty, 1984), la période de seiche peut se situer entre quelques minutes et plusieurs heures; pouvant atteindre deux jours (tableau 2.1). Ce tableau

---

[1] L'axe d'oscillation est un axe imaginaire orienté dans le sens de la seiche et situé à mi-chemin des côtes latérales à la seiche (Mortimer, 1979).

Tableau 2.1 Périodes d'oscillation des seiches de certains lacs.

LAC	LOCALISATION	DIMENSION long. max. (km)	DIMENSION prof. moy. (m)	PÉRIODE seiche uni-nodale T1 (min)	RATIOS DES PÉRIODES (Tn/T1) seiche à "n" noeuds (Tn) 2	3	4	5	6
Mich.-Huron	É.U.; Canada			2700.00					
Azov	URSS			1470.00	0.603	0.522			
Aral	URSS	430.0	15.6	1368.00					
Érié	É.U.; Canada	400.0	21.0	858.00	0.632	0.499	0.292		
Michigan	É.U.		99.0	543.00	0.578	0.411	0.344	0.278	0.222
Supérieur	É.U.; Canada			480.00					
Huron	Canada	310.0	76.0	289.00					
Ontario	É.U.; Canada			289.00					
Baikal	URSS	665.0	680.0	278.20					
George	Australie	30.0	5.5	131.00					
Geneva	Suisse	75.0	175.0	74.00	0.480				
Constance	Allemagne;Suiss	66.0	90.0	55.80	0.700	0.503			
Chiemsee	Allemagne	14.7	24.5	43.20					
Loch Ness	Écosse	38.6	132.0	31.50					
Yamanaka	Japon	5.0	8.2	15.60	0.677	0.350			
Loch Treig	Écosse	8.3	63.2	9.20	0.560				
Chiuzenji	Japon	5.9	85.4	7.80					

D'après MURTY(1984) et HUTCHINSON(1975)

permet de constater une diminution considérable de la période des seiches ayant plus d'un noeud. Par rapport aux seiches uni-nodales, la période des seiches bi-nodales est réduite de 30 à 50%; celle des seiches tri-nodales est réduite de 50 à 60%; et ainsi de suite. Une seiche comportant six noeuds a une période équivalente à seulement 20% d'une seiche uni-nodale.

Tout comme la période de seiche et la position des noeuds, la hauteur de seiche dépend de la forme des réservoirs. Cependant, la variable déterminante est la profondeur. Les plus importantes seiches se produisent dans les lacs peu profonds ou encore dans les parties peu profondes d'un réservoir. Toutefois, la hauteur de seiche est surtout tributaire de l'intensité de la force extérieure qui l'engendre; une forte intensité entraîne une hauteur plus importante. Elle dépend aussi de la structure verticale de l'eau (salinité, pression, température, etc.) et de la présence ou de l'absence de glace; une couverture de glace limite les mouvements verticaux d'une surface d'eau.

2.2 L'origine des seiches de surface

Les seiches de surface sont le résultat d'un dérèglement momentané de l'équilibre hydrostatique d'une masse d'eau qui se traduit par une dénivellation. Ce dérèglement est causé par l'action subite d'une force extérieure.

La force extérieure peut provenir des affluents dont les débits ont été soudainement augmentés de façon significative. Une augmentation soudaine du débit peut en effet causer une hausse localisée du niveau d'eau. Ce phénomène n'a toutefois d'importance que pour les réservoirs de faible superficie.

La force extérieure peut aussi provenir d'un événement catastrophique, tel un éboulis. Mais, tout comme dans le cas des affluents, ce phénomène n'a d'importance que pour les petits réservoirs.

Les travaux menés jusqu'à présent démontrent que la plus importante force extérieure est d'origine atmosphérique (Murty, 1984). Le vent (vitesse, direction et persistance) et la pression atmosphérique sont les paramètres météorologiques les plus déterminants dans la formation des seiches.

2.2.1 L'effet du vent

A l'interface air-eau, le vent exerce une contrainte de cisaillement qui se traduit par l'établissement d'un courant d'eau orienté dans le sens du vent. A cause de l'effet de la rotation de la terre (force de Coriolis), la direction du courant est, en réalité, dans l'hémisphère nord, décliné légèrement vers la droite d'environ 20 degrés (Linsley et al., 1982).

Un vent passant au-dessus d'une surface lacustre a pour conséquence de canaliser l'eau vers le rivage en aval. Si le vent est persistant et assez fort, l'eau s'empile sur le rivage et donne naissance à une déformation verticale du plan d'eau, initiant ainsi une seiche.

Les travaux de Hellström (1941) ont permis de saisir l'effet du vent sur la surface lacustre et de définir certains comportements généraux (figure 2.2). Sur les rives sous le vent, il y a une déformation parabolique convexe (figure 2.2A), alors que sur les rives au vent, il y a une déformation parabolique concave (figure 2.2D). En eau profonde — dans la partie centrale d'un réservoir lacustre — la déformation est linéaire (figure 2.2B). La présence d'un haut-fond introduit toutefois une distorsion sur la linéarité et donne lieu à une déformation parabolique convexe (figure 2.2C).

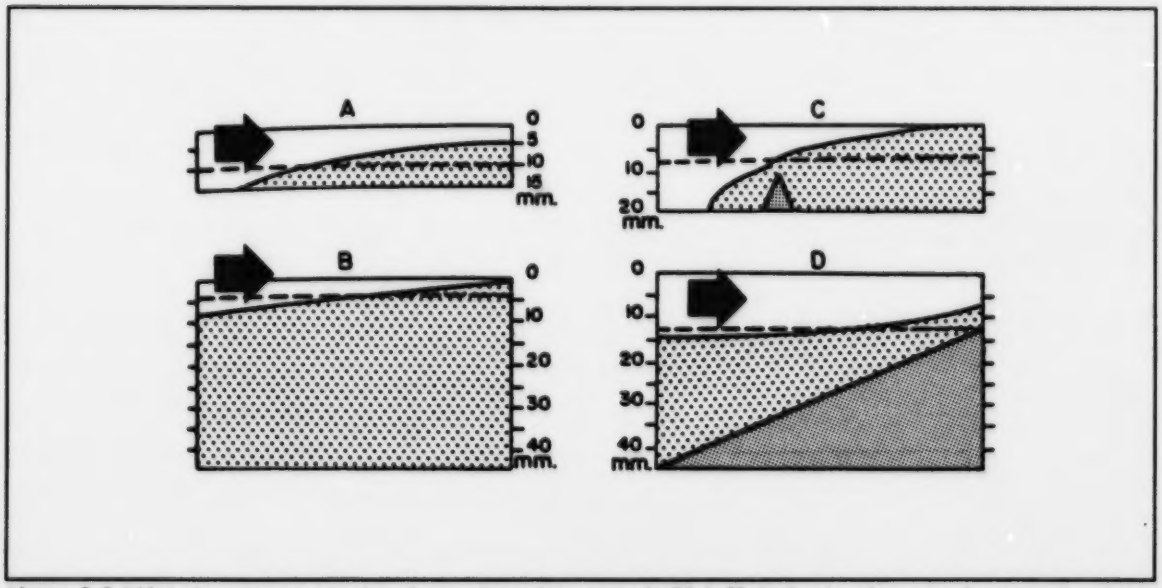

Figure 2.2 Effet du vent sur un plan d'eau. Pour des vents de 30 à 35 km/h: A, rive sous le vent; B, en eau profonde; C, haut-fond; D, rive au vent (d'après Hellstrom, 1941).

Des études ont démontré qu'il existe une relation entre la hauteur de seiche résultant de l'action du vent (**H**), la vitesse du vent (**V**), la longueur du plan d'eau soumis au vent (**F**) et la profondeur du lac (**P**). La longueur du plan d'eau soumis au vent représente la distance entre deux rivages opposés mesurée dans l'axe de la seiche (figure 2.1). En représentant la profondeur du lac par une moyenne (P_m), cette relation s'établit ainsi (Forrester, 1983):

$$H = a \frac{V^b F}{P_m} \qquad \text{(éq. 2.2)}$$

Le paramètre **V** est exprimé en mètre par seconde et les paramètres **F** et P_m sont en mètre; **a** et **b** sont des constantes qui dépendent du contexte environnemental et géographique (paysage; orientation, forme et dimension du lac; etc.). Les observations aux lacs Ontario, Érié et Huron attribuent à **a** une valeur comprise entre 4 x 10^{-7} et 5 x 10^{-7} et à **b** la valeur 2 (Forrester, 1983).

2.2.2 L'effet de la pression atmosphérique

La pression atmosphérique agit sur une surface d'eau seulement s'il existe, à l'intérieur du périmètre du plan d'eau, une variation spatiale significative de la pression. A ce moment là, le niveau de la surface d'eau s'ajuste au patron de distribution de la pression. Là où la pression est haute, le niveau d'eau descend, et là où elle est basse, le niveau monte.

La relation qui existe entre la variation spatiale de la pression atmosphérique et les ajustements du niveau de la surface d'eau est définie par l'équivalence barométrique. Si l'on remplace le mercure d'un baromètre par l'eau, une pression atmosphérique de

100 kilopascals (kPa) supporte une colonne de 10 mètres d'eau (Forrester, 1983; Murty, 1984). Nous avons donc une équivalence barométrique de 10 cm d'eau pour 1 kPa. Cela signifie que pour une différence spatiale de 1 kPa, le niveau d'eau s'ajustera à la hausse et à la baisse pour donner une dénivellation de 10 cm.

3. MÉTHODOLOGIE

La présente étude utilise une méthode empruntée à la géométrie descriptive qui consiste à étudier le comportement relationnel à partir de figures. Dans cette étude, les analyses sont essentiellement descriptives. Les relations de cause à effet sont déduites par analogie.

Bien que cela eut été avantageux et intéressant, l'étude ne fait pas usage des statistiques descriptives conventionnelles pour décrire le comportement général des seiches. Comme vous le constaterez à la prochaine section, il en est ainsi parce que la base de données doit faire l'objet d'une procédure de validation trop laborieuse et longue pour être réalisée sur l'ensemble des données.

L'étude n'aborde pas non plus les analyses statistiques visant à établir les relations entre les paramètres atmosphériques et les seiches, ceci en raison principalement du trop peu de données validées.

3.1 Les données

Les données utilisées dans cette étude sont de deux types. Il y a celles sur le niveau d'eau du lac Saint-Jean qui servent à l'identification et à l'examen des seiches; ce sont **les données hydrométriques**. Puis il y a celles sur les conditions atmosphériques affectant le niveau d'eau; dans ce cas, ce sont **les données météorologiques**.

3.1.1 Les données hydrométriques

Les données hydrométriques nous ont été fournies exclusivement par la Société d'électrolyse et de chimie Alcan Ltée qui en est propriétaire. Ce sont des données relatives aux variations du niveau d'eau du lac Saint-Jean qui, depuis 1978, ont été mesurées systématiquement aux quatre heures (0, 4, 8, 12, 16, 20h), soit six valeurs par jour, à trois endroits différents, soit: Roberval, Saint-Gédéon et Saint-Henri (figure 3.1 et tableau 3.1).

Tableau 3.1 Fiche technique relative aux stations hydrométriques du lac Saint-Jean.

Nom de la station:	Roberval	St-Henri	St-Gédéon
Numéro de la station:	062911	062904	062905
Latitude:	48°31'34"	48°39'20"	48°32'20"
Longitude:	72°13'17"	71°51'00"	71°46'50"
Altitude:	103.0 mètres	103.3 mètres	103.3 mètres
Bassin hydrographique:	Lac St-Jean	Lac St-Jean	Lac St-Jean
Bassin versant:	73,000 km^2	73,000 km^2	73,000 km^2
Équipement:	- abri hydrométrique - manomètre "CAE" - servo-contrôle - batterie - accumulateur CA-CC - poinconneuse "STEVENS" - mémomark - compte-bulles - sortie	- abri hydrométrique - manomètre "CAE" - servo-contrôle - poinconneuse "STEVENS" - batterie - alimentation CA-CC - compte-bulles - sorties	- abri hydrométrique - puits - flotteurs - indicateur extérieur - poinconneuse "STEVENS" - mémomark
Communication:	Télémark Adapteur téléphonique Ligne téléphonique Data logger	Télémark Adapteur téléphonique Ligne téléphonique Data logger	Télémark Adapteur téléphonique Ligne téléphonique
Début de la station:	1913-1919 1919-1975 1973-	1977-	1970-

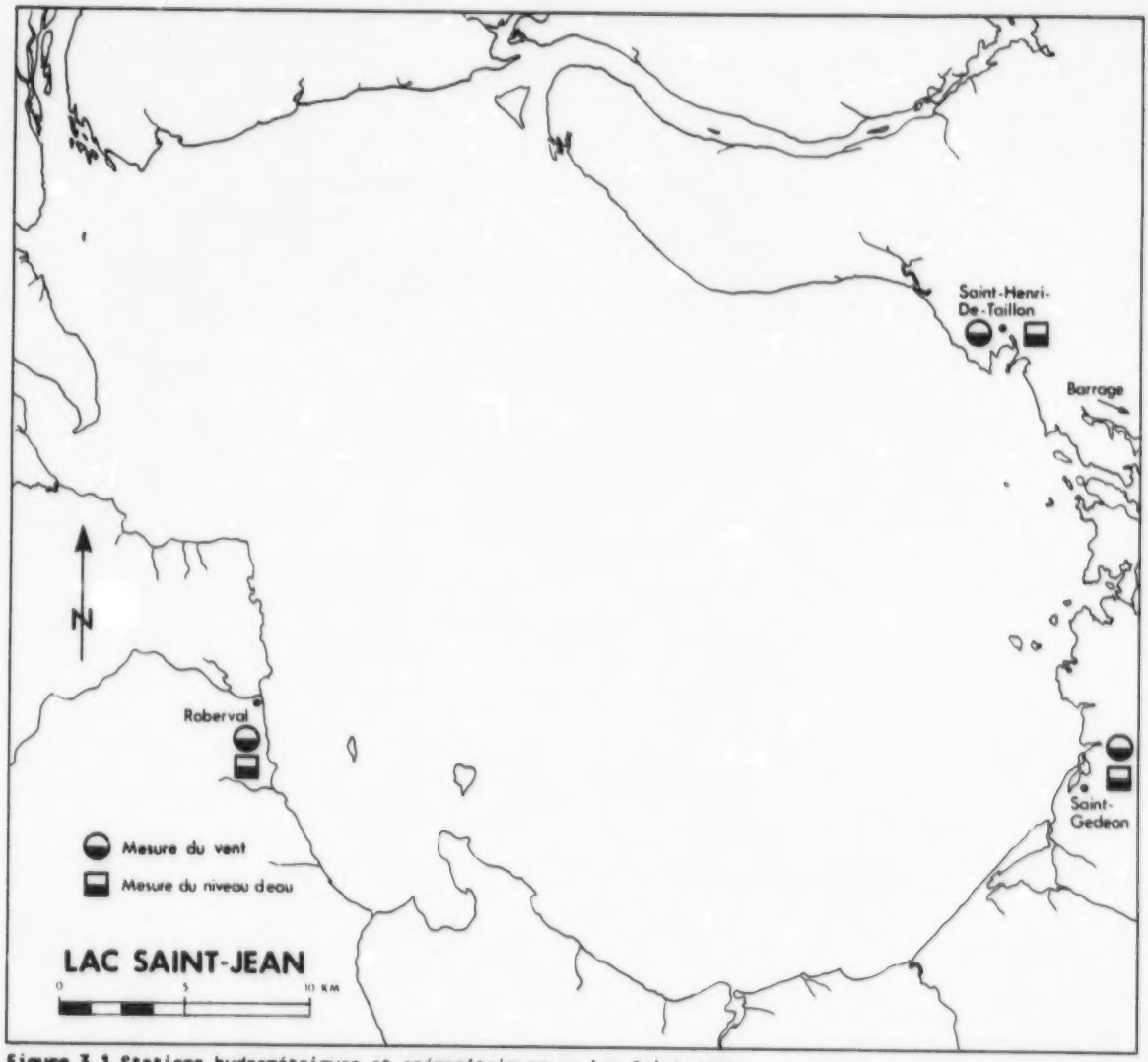

Figure 3.1 Stations hydrométriques et anémométriques au lac Saint-Jean.

Les appareils de mesure (les jauges) sont de deux types. Aux stations hydrométriques de Roberval et Saint-Henri, les jauges sont des manomètres "CAE", alors qu'à la station de Saint-Gédéon, la jauge est un puits muni de flotteurs. La jauge de Saint-Gédéon mesure directement les variations du niveau d'eau, tandis que les autres jauges traduisent les variations de pression mesurées sur une colonne d'eau du lac en équivalent de variations du niveau d'eau. La précision de ces deux types d'appareil est de ±1 cm.

Il est à noter que les données sont échantillonnées automatiquement mais que le transfert de l'appareil enregistreur à la base de données informatisées d'Alcan est réalisé par l'intermédiaire d'un opérateur qui transcode les signaux reçus de l'enregistreur par appel téléphonique. Cette opération peut conduire à des erreurs d'enregistrement.

Par ailleurs, après le transcodage, l'opérateur effectue un contrôle subjectif de la qualité de l'information et associe à chaque donnée un indicateur (flag) prenant la valeur 0 ou 1; où 0 indique que la donnée est bonne et 1 indique que la donnée est douteuse. La valeur 1 est introduite lorsque l'opérateur note qu'une jauge se comporte très différemment des autres. Dans de tel cas, on avise le technicien chargé de l'entretien des appareils des stations hydrométriques afin de procéder à une vérification de la jauge et, s'il y a lieu, à une réparation. Suite à une réparation ou à un constat de problème, le technicien rédige un rapport et le transmet au responsable. L'indicateur (flag) n'est toutefois pas révisé s'il n'y avait pas de problème. Il se produit donc des cas où les données sont rejetées (le code 1 est assigné) alors qu'elles sont représentatives d'une seiche.

Les données hydrométriques utilisées dans cette étude couvre la période du 1er janvier 1981 au 31 juillet 1988.

3.1.2 Les données météorologiques

En considération de la connaissance acquise jusqu'à présent (chapitre 2), il est bien évident que les paramètres météorologiques de vitesse et de direction des vents ainsi que des gradients de pression sont ceux à retenir pour cette étude.

Les données relatives aux vents proviennent, d'une part, de la station météorologique de l'aéroport de Roberval et, d'autre part, des stations anémométriques d'Alcan situées à proximité des stations hydrométriques de Saint-Gédéon et de Saint-Henri. Les données de la station météorologique ont été fournies par le Service de l'Environnement Atmosphérique (SEA), région du Québec, d'Environnement Canada. Celles-ci sont disponibles pour toute la période d'étude. Les données des stations anémométriques ont été fournies par la Société Alcan. Celles-là ne sont disponibles qu'à partir de juin 1985 à Saint-Gédéon et de novembre 1986 à Saint-Henri.

Les gradients de pression atmosphérique sont obtenus des cartes synoptiques produites par le Département du Commerce des États-Unis[2]. Ce sont des cartes à l'échelle de l'Amérique du Nord.

3.2 La procédure d'analyse

La procédure d'analyse s'articule autour de deux volets. Le premier, intitulé "Les seiches du lac Saint-Jean" (section 4.1), examine l'ensemble des données hydrométriques de la période du 1er janvier 1981 au 31 juillet 1988. Ce volet permet d'identifier les périodes de seiches à fluctuations importantes qu'a connues le lac Saint-Jean au cours des sept dernières années, soit celles qui serviront à l'étude.

Le deuxième volet, intitulé "Les effets atmosphériques" (section 4.2), examine les conditions météorologiques qui prévalaient au cours des périodes identifiées à la section 4.1. Ce volet permet de déterminer les éléments qui peuvent servir à expliquer la formation des seiches importantes du lac Saint-Jean.

---

[2] "Daily weather maps; weekly series" du National Oceanic and Atmospheric Administration; National Environmental Satellite, Data, and Information Service; Department of Commerce; United States of America. Ce document peut être obtenu à l'adresse suivante: United States, Government Printing office, Division of Public Documents, Washington, D.C. 20402.

Le premier volet tente donc de saisir le comportement du phénomène dans son ensemble alors que le deuxième fait une étude de cas.

En raison de la subjectivité du contrôle de qualité sur les données, tel qu'établi par Alcan (voir page 16), nous avons jugé prudent de réaliser nos analyses sans la considération des indicateurs (flags) accompagnant chacune des valeurs de la base de données.

Toutefois, en admettant qu'une valeur est bonne jusqu'à preuve du contraire, nous avons procédé à une validation des données hydrométriques à l'aide des rapports d'entretien faits par le technicien en charge. Afin de minimiser le pénible travail, cette procédure n'a été accomplie que sur les données associées à des seiches importantes. Cette procédure est réalisée en deux étapes. La première consiste à valider les données où les écarts de niveau d'eau entre les stations hydrométriques sont jugés importants. Cette étape permet d'identifier les épisodes de seiches importantes. La deuxième étape consiste à valider les données hydrométriques des épisodes retenus.

En raison de la disponibilité des données et pour assurer une uniformité d'analyse, l'information sur les vents provenant de Roberval (station météorologique aéroportuaire) est celle utilisée pour réaliser l'étude du deuxième volet. Les données anémométriques de Saint-Gédéon et de Saint-Henri sont un complément permettant une considération de la variabilité spatiale des vents.

Pour éviter la surcharge et aussi en faciliter la consultation, seules les figures jugées représentatives ou pertinentes à un élément de discussion ont été retenues dans la présentation des résultats.

4. RÉSULTATS

4.1 Les seiches du lac Saint-Jean

Avant d'entreprendre l'examen des données hydrométriques, il convient de rappeler qu'une seiche est un événement qui, initialement, est produit par une force extérieure et qui, après relâchement de cette force, est suivi d'une oscillation momentanée dont l'amplitude diminue avec le temps. Par rapport à deux rives opposées d'un plan d'eau, une seiche identifie donc un ensemble de mouvements verticaux — une sorte de balancement — consécutifs de courte durée.

Une seiche ne peut donc pas être simplement définie en reconnaissant un écart entre deux stations puisque cet écart ne représente qu'un moment d'un ensemble de mouvements verticaux. Il faut donc établir une procédure afin de distinguer les mouvements associés à une même seiche et de l'identifier comme événement. Comme nous pourrons le constater, ce n'est pas une tâche simple. Cette tâche se complique d'autant plus que nous avons à faire face à une base de données comportant des valeurs nécessitant une validation.

De plus, la période caractéristique d'une seiche associée à un lac de dimensions semblables au lac St-Jean est normalement inférieure à trois heures (tableaux 2.1 et 4.1). Puisque nous avons des données aux quatre heures, il est évident qu'il est hasardeux de se pencher sur le phénomène d'oscillation de la masse d'eau. Il est évident aussi que la définition de l'événement "seiche" (écarts de niveaux et la durée, par exemple) est limitée et pose un problème de précision. D'ailleurs, nous verrons plus loin qu'il nous est impossible de déceler l'oscillation résultant des dénivellations importantes forcées. De ce fait, et bien que nous

parlions de seiches, notre étude examine en réalité une portion de ces événements, celle liée à leur naissance (dénivellation forcée).

Tableau 4.1 Périodes d'oscillation des seiches (en heures) établies à l'aide de l'équation 2.1 (voir page 7)

Long. de l'axe	Profondeur (m)						
	10	20	30	40	50	60	70
10	0,6	0,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
20	1,1	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5	0,4
30	1,7	1,2	1,0	0,8	0,8	0,8	0,7
40	2,2	1,6	1,3	1,1	1,0	0,9	0,8
50	2,8	2,0	1,6	1,4	1,3	1,1	1,1
60	3,4	2,4	1,9	1,7	1,5	1,4	1,3
70	3,9	2,8	2,3	2,0	1,8	1,6	1,5
80	4,5	3,2	2,6	2,2	2,0	1,8	1,7

Source: Hydrométéorologie, Service de l'Environnement Atmosphérique, Environnemnet Canada, Downsview.

Dans un premier temps, nous avons considéré les écarts absolus de niveau d'eau entre les stations hydrométriques, soit: Roberval versus Saint-Gédéon, Saint-Henri versus Saint-Gédéon, et Saint-Henri versus Roberval; et ce, selon un comportement annuel (voir par exemple, figure 4.1). Malgré le fait que l'aspect qualitatif de certaines données peut être mis en doute, dû à l'absence d'un contrôle objectif et systématique, les résultats obtenus sont intéressants et permettent de faire les observations suivantes:

a) les écarts de niveau d'eau tendent à être plus importants entre Saint-Henri et Roberval;

b) les écarts de niveau d'eau sont moins importants entre Saint-Gédéon et Saint-Henri;

c) les plus grands écarts de niveau d'eau s'observent aux périodes non hivernales, notamment au printemps et surtout à la fin de l'été et à l'automne.

En considération de la nature des problèmes que suscitent les seiches au lac Saint-Jean, nous avons retenu arbitrairement le seuil de 15 cm pour délimiter les seiches jugées significatives. Ce seuil permet d'une certaine façon de distinguer les seiches

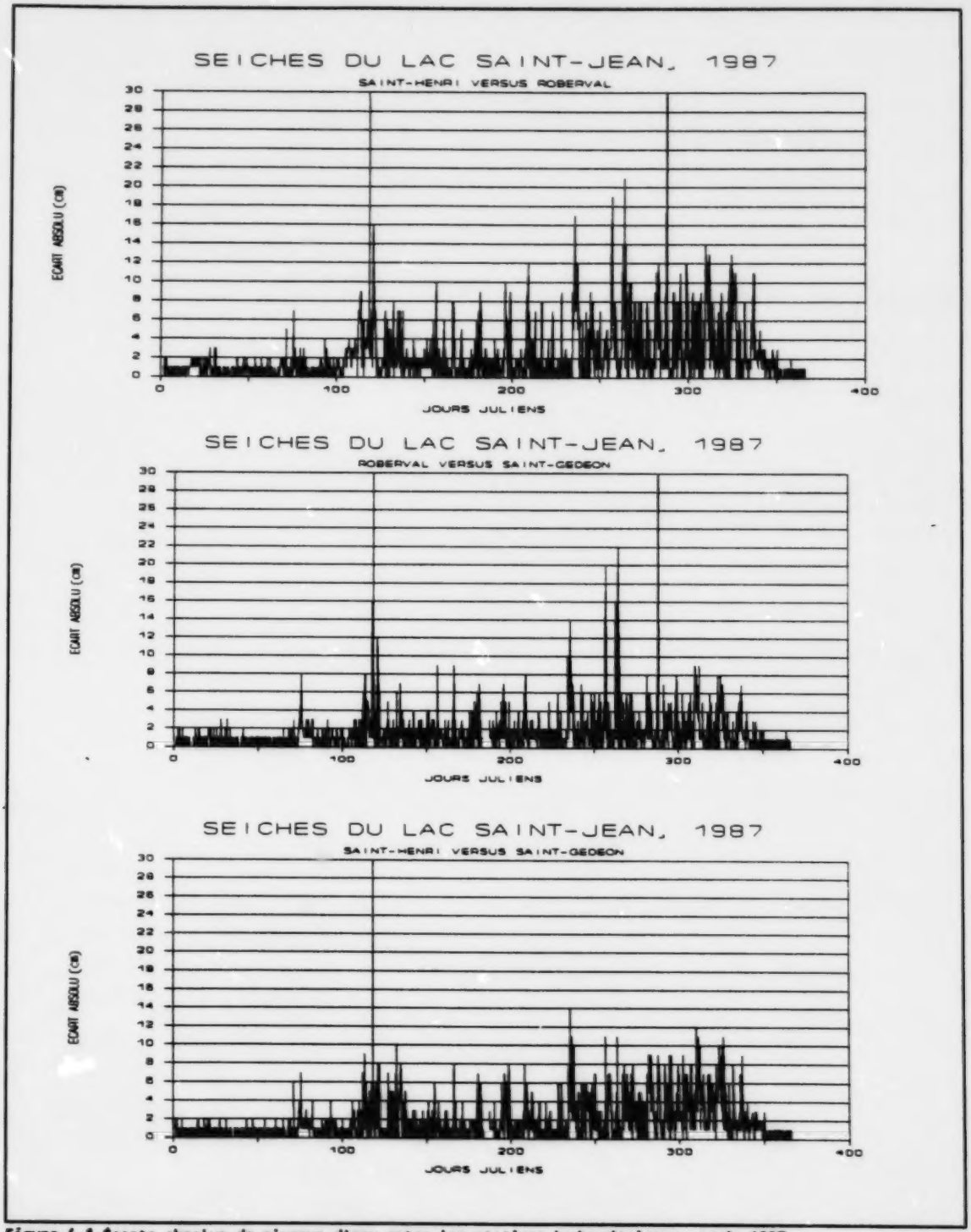

Figure 4.1 Écarts absolus de niveaux d'eau entre les stations hydrométriques, année 1987.

importantes des seiches moins importantes. En ne retenant que celles qui sont importantes, nous introduisons une simplification majeure dans la procédure d'identification des seiches puisque le nombre de cas est alors grandement réduit et qu'il est pensable d'exécuter manuellement le contrôle sur la qualité des données.

Nous avons identifié sur l'ensemble des données, soit pour la période du 1er janvier 1981 au 31 juillet 1988, 162 jours avec au moins une valeur (écart entre deux stations) supérieure ou égale à 15 cm. Toutefois, l'exercice de contrôle sur les données par l'examen des rapports d'entretien a invalidé un grand nombre de ces valeurs. Des 162 jours sélectionnés seulement 21 furent acceptés (figure 4.2).

Nous présentons au tableau 4.2 l'inventaire détaillé des 21 jours où l'écart de niveau d'eau a été supérieur ou égal à 15 cm. On note trois éléments significatifs dans ce tableau. Les écarts de niveau maximaux au lac Saint-Jean semblent se situer autour de 20 cm. Ces écarts importants (de 15 à 21 cm) ont eu lieu quelques fois au printemps mais surtout à la fin de l'été et à l'automne (de août à décembre). Ceux-ci se produisent uniquement dans l'axe reliant Roberval à l'une des deux autres stations.

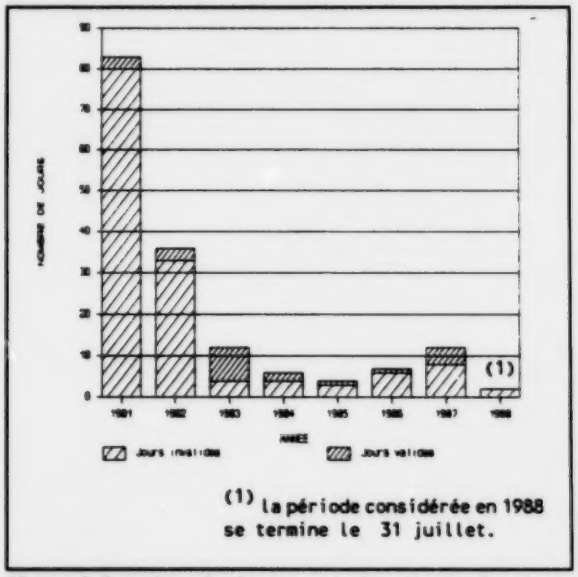

Figure 4.2 Nombre de jours avec des écarts de niveau d'eau supérieurs ou égaux à 15 cm.

Des 21 jours où l'écart de niveau d'eau a été supérieur ou égal à 15 cm, certains sont consécutifs et identifient le même événement, soit une seiche de plus d'une journée. En réalité, ces 21 jours

Tableau 4.2 Écarts (en cm) de niveau d'eau importants du lac Saint-Jean survenus entre le 1er janvier 1981 et le 31 juillet 1988 (données validées).

JOUR	SEICHE	DATE	HEURES	ÉCARTS	STATIONS
1	1	20-sep-81	8	-15	Rob-Hen
2	2	30-sep-81	16	-17	Rob-Ged
		30-sep-81	20	-15	Rob-Ged
3	3	30-nov-81	12	-15	Rob-Hen
4	4	06-nov-82	8	-15	Rob-Hen
		06-nov-82	12	-16	Rob-Hen
		06-nov-82	16	-15	Rob-Hen
5	5	07-dec-82	12	-20	Rob-Hen
6		09-dec-82	0	-17	Rob-Hen
7	6	23-mai-83	16	18	Rob-Ged
		23-mai-83	20	17	Rob-Ged
8		24-mai-83	0	21	Rob-Ged
		24-mai-83	0	16	Rob-Hen
		24-mai-83	4	21	Rob-Ged
		24-mai-83	4	17	Rob-Hen
		24-mai-83	8	18	Rob-Ged
		24-mai-83	8	18	Rob-Hen
		24-mai-83	12	19	Rob-Ged
		24-mai-83	12	17	Rob-Hen
		24-mai-83	16	20	Rob-Ged
		24-mai-83	16	17	Rob-Hen
		24-mai-83	20	19	Rob-Ged
		24-mai-83	20	16	Rob-Hen
9		25-mai-83	0	20	Rob-Ged
		25-mai-83	0	15	Rob-Hen
		25-mai-83	4	20	Rob-Ged
		25-mai-83	4	16	Rob-Hen
		25-mai-83	8	19	Rob-Ged
		25-mai-83	8	16	Rob-Hen
		25-mai-83	12	20	Rob-Ged
		25-mai-83	12	18	Rob-Hen
10	7	20-aoû-83	12	-16	Rob-Hen
		20-aoû-83	16	-17	Rob-Ged
		20-aoû-83	16	-20	Rob-Hen
		20-aoû-83	20	-15	Rob-Ged
		20-aoû-83	20	-18	Rob-Hen
11		21-aoû-83	0	-16	Rob-Hen
		21-aoû-83	4	-15	Rob-Hen
12	8	15-oct-83	4	-15	Rob-Hen
13	9	26-nov-83	8	-17	Rob-Ged
		26-nov-83	8	-20	Rob-Hen
		26-nov-83	12	-15	Rob-Ged
		26-nov-83	12	-18	Rob-Hen
		26-nov-83	16	-15	Rob-Hen
14	10	07-dec-83	16	-15	Rob-Hen
15	11	02-nov-84	0	-16	Rob-Hen
		02-nov-84	8	-16	Rob-Hen
		02-nov-84	12	-15	Rob-Hen
		02-nov-84	16	-18	Rob-Hen
16	12	28-oct-85	4	-15	Rob-Ged
17	13	15-nov-86	0	-16	Rob-Hen
18	14	30-avr-87	16	-16	Rob-Hen
19	15	23-aoû-87	16	-17	Rob-Hen
20	16	13-sep-87	16	17	Rob-Ged
		13-sep-87	16	16	Rob-Hen
21		14-sep-87	0	20	Rob-Ged
		14-sep-87	0	19	Rob-Hen
		14-sep-87	8	16	Rob-Ged
		14-sep-87	8	15	Rob-Hen

représentent 16 seiches dites importantes dont 2 seulement ont eu lieu au printemps. Pour la période considérée, cela laisse entendre une récurrence de 1 seiche printanière importante par 3,8 ans et de 1,9 seiche importante de fin d'été ou d'automne par an. Bref, il semble qu'il y a en moyenne au lac Saint-Jean 2,1 seiches par année avec une très forte probabilité d'occurrence à la fin de l'été ou à l'automne.

Nous avons examiné le comportement du niveau d'eau à chacune des stations hydrométriques pour les moments correspondant aux 16 seiches dites importantes. Afin de garder une certaine uniformité, d'avoir une vue d'ensemble du phénomène et, éventuellement, de

mieux saisir les relations entre les éléments atmosphériques et le plan d'eau, nous avons défini chaque épisode de seiche par une séquence de 10 jours (tableau 4.3). Nous avons défini en outre le niveau d'eau moyen entre les trois stations à l'aide d'une moyenne mobile d'une séquence de 16 heures (voir par exemple la figure 4.3).

Tableau 4.3 Épisodes de seiches importantes du lac Saint-Jean.

Épisode			Date de l'évènement retenu
#	Date	Jour julien	
1	15-09-81 au 24-09-81	258 au 267	20-09-81
2	25-09-81 au 4-10-81	268 au 277	30-09-81
3	25-11-81 au 4-12-81	329 au 338	30-11-81
4	1-11-82 au 10-11-82	305 au 314	6-11-82
5	2-12-82 au 11-12-82	336 au 345	7 & 9-12-82
6	18-05-83 au 27-05-83	138 au 147	23 au 25-05-83
7	15-08-83 au 24-08-83	227 au 236	20 & 21-08-83
8	10-10-83 au 19-10-83	283 au 292	15-10-83
9	21-11-83 au 30-11-83	325 au 334	26-11-83
10	2-12-83 au 11-12-83	336 au 345	7-12-83
11	27-10-84 au 5-11-84	301 au 310	2-11-84
12	23-10-85 au 1-11-85	296 au 305	28-10-85
13	9-11-86 au 18-11-86	313 au 322	15-11-86
14	25-04-87 au 4-05-87	115 au 124	30-04-87
15	18-08-87 au 27-08-87	230 au 239	23-08-87
16	8-09-87 au 17-09-87	251 au 260	13 & 14-09-87

Cette représentation épisodique des événements importants permet de noter qu'à plusieurs moments le plan d'eau est incliné, et qu'il peut être incliné dans le même sens, à des degrés variables bien sûr, pendant plusieurs journées (figures 4.3 à 4.8), voire plus d'une semaine comme ce fut le cas en août 1983 (figure 4.5). Le processus de formation[3] de seiches importantes peut s'échelonner sur plus d'une journée et être représenté par une formation saccadée (en dents de scie) (figures 4.3 et 4.8). Dans certains cas, il peut être difficile de trancher entre une seiche résultant d'un processus de formation saccadée ou plusieurs seiches résultant de plusieurs processus de formation indépendants, comme ce fut le cas notamment en décembre 1982 (figure 4.4) et en novembre 1986 (figure 4.7). A l'examen du comportement des niveaux d'eau de certains épisodes, il semble de plus que les niveaux à Roberval

[3] Nous faisons référence à l'action de forcer le plan d'eau à se déformer pour donner une pente. Cette action prenant fin quand la force qui l'engendre s'estompe.

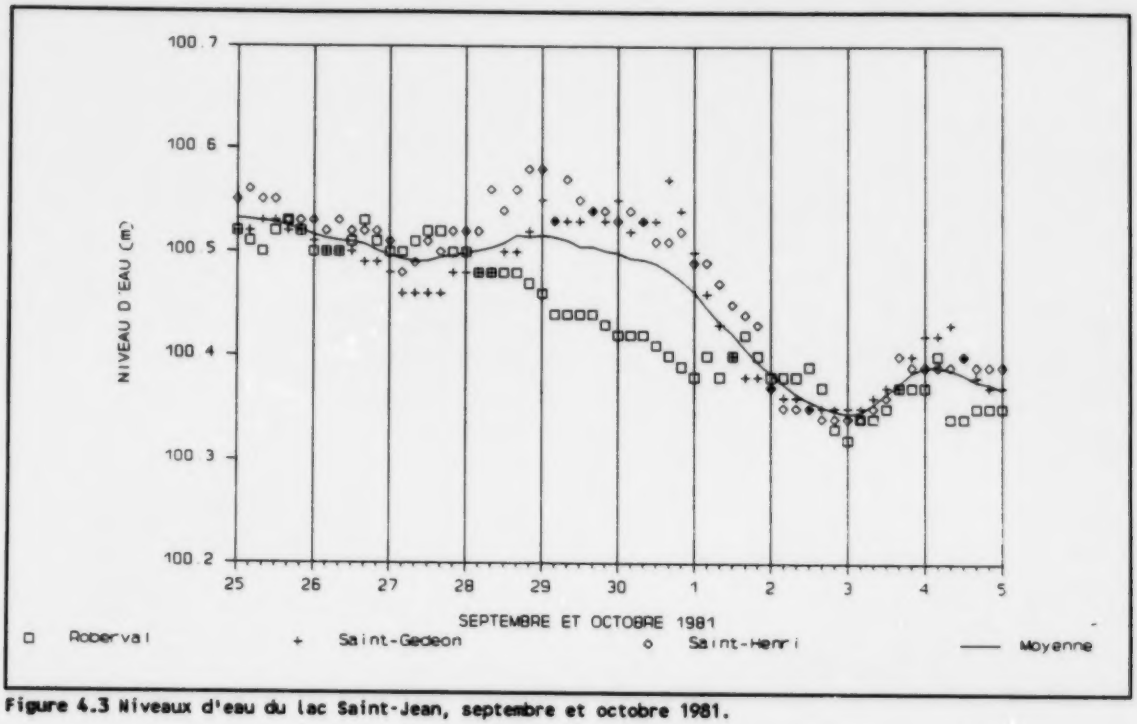

Figure 4.3 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, septembre et octobre 1981.

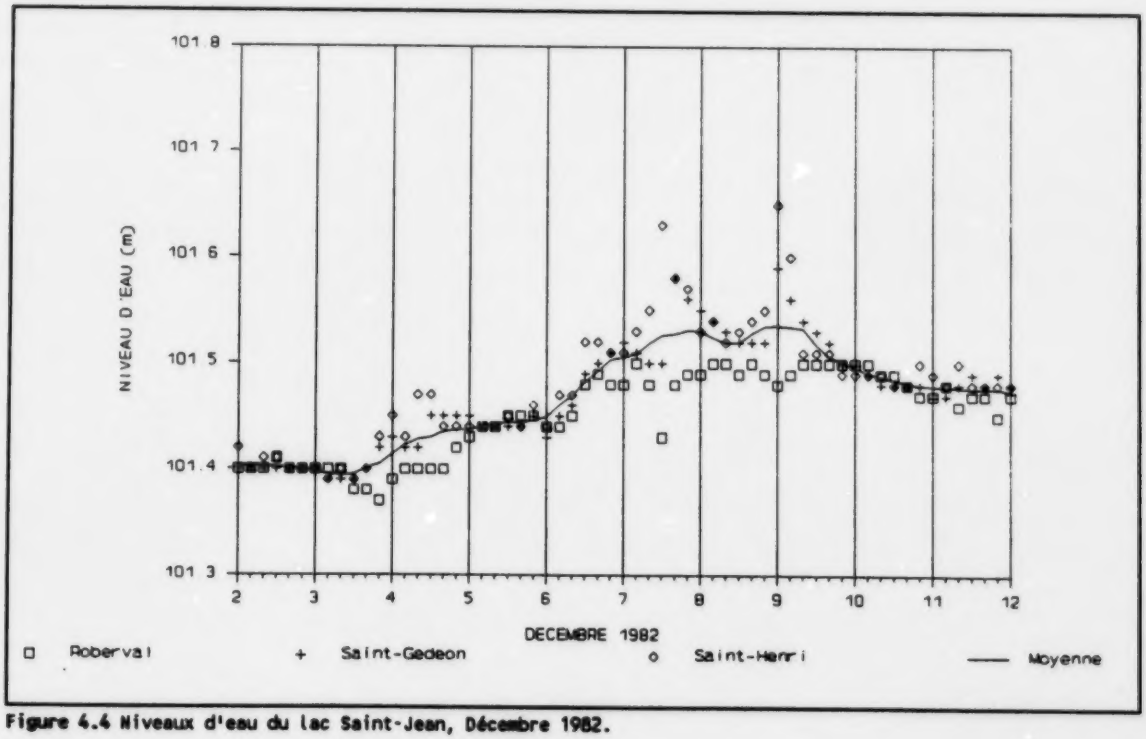

Figure 4.4 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, Décembre 1982.

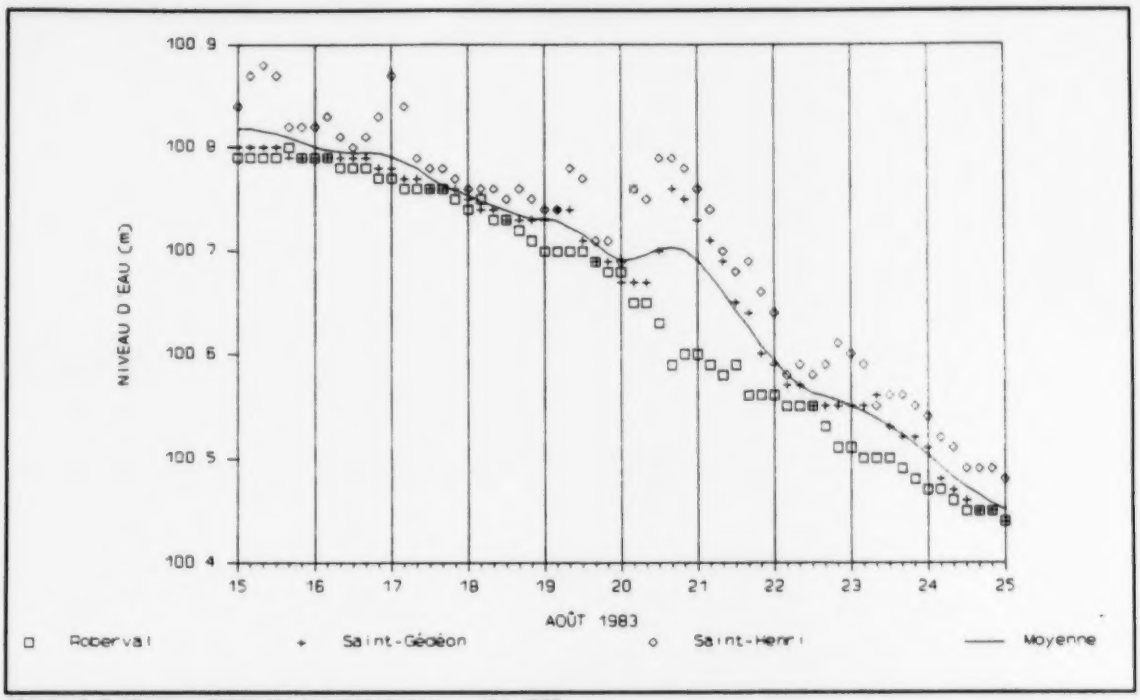

Figure 4.5 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, août 1983.

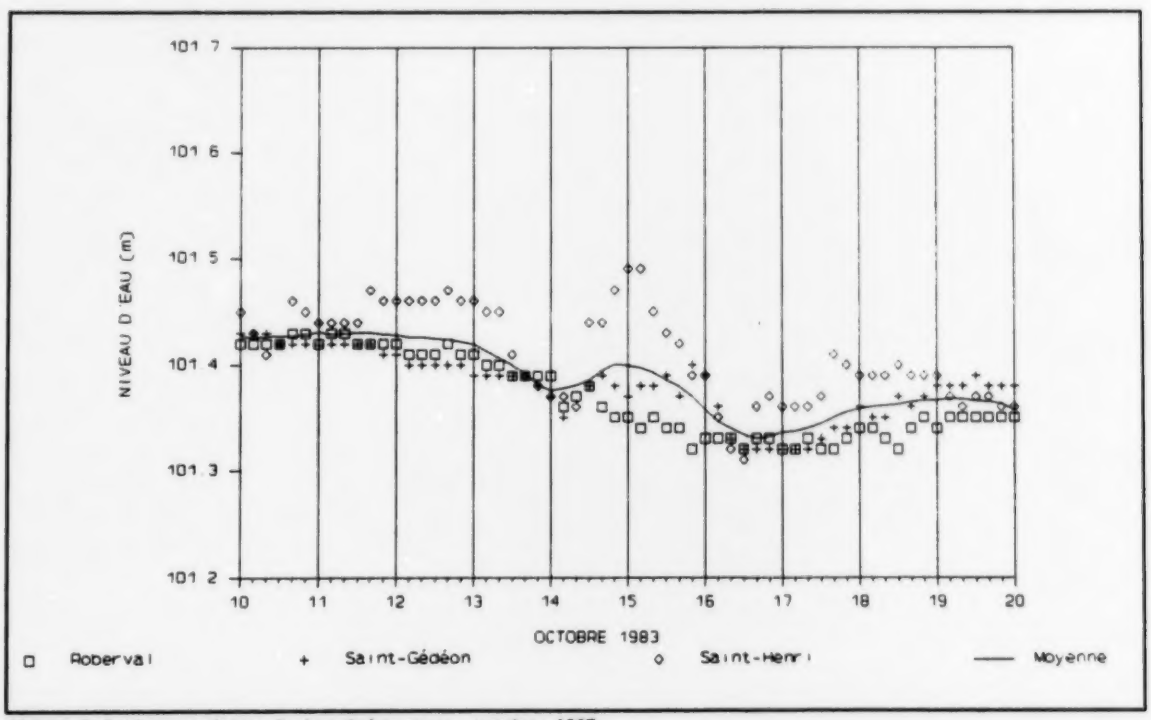

Figure 4.6 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, octobre 1983.

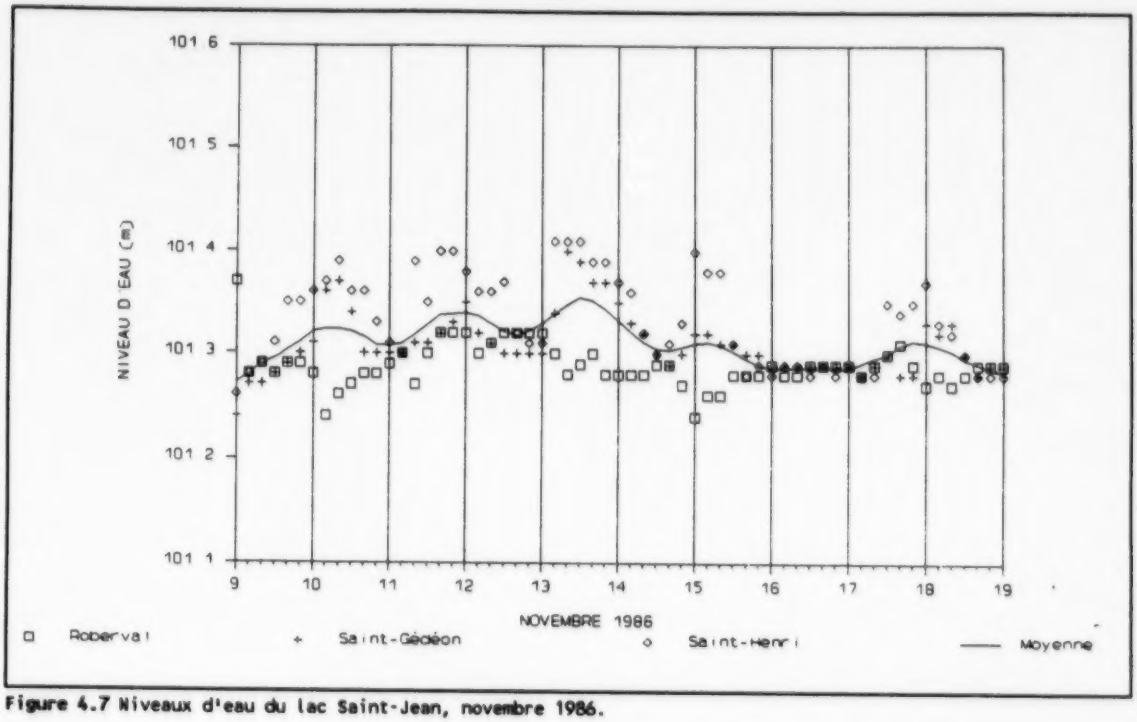

Figure 4.7 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, novembre 1986.

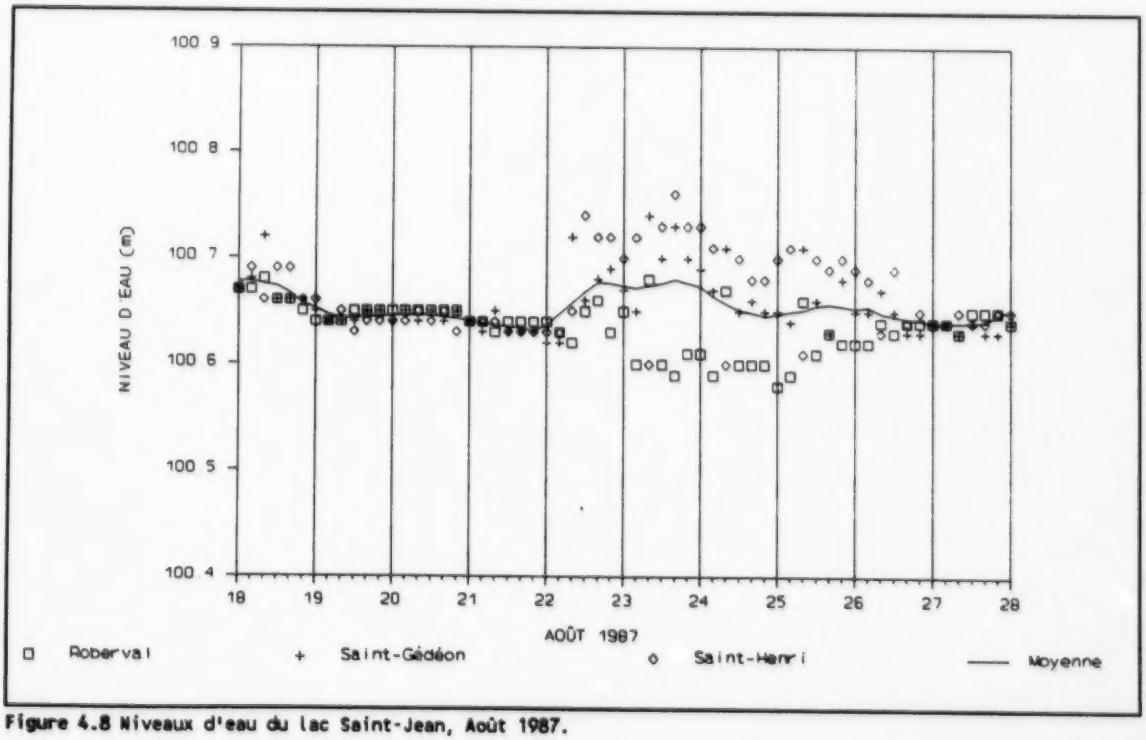

Figure 4.8 Niveaux d'eau du lac Saint-Jean, Août 1987.

sont plus stables, et donc moins affectés par le processus de formation (figures 4.3, 4.5 et 4.6)

Nous constatons aussi qu'il y a peu d'évidence de l'existence d'une oscillation résultant d'un processus de formation de seiche. Le plan d'eau est déformé puis reprend sa forme normale sans donner lieu à une déformation opposée, à tout le moins significative, tel un balancement. En d'autres termes, la durée d'une seiche semble se limiter essentiellement au processus de formation. Comme mentionné à la section 4.1 (voir page 19), cela est probablement dû au trop grand intervalle de temps d'échantillonnage (4 heures) qui est apparemment supérieur à la période d'oscillation.

En définissant la durée d'une seiche par le temps qui s'écoule entre le moment où le plan d'eau débute une inclinaison et le moment où il retrouve l'horizontalité, il semble que les seiches importantes du lac Saint-Jean durent entre 20 et 124 heures. Cependant, les moments où les écarts de niveau d'eau ont été supérieurs ou égaux à 15 cm dans le cadre d'une seiche durent généralement moins de 24 heures. Toutefois, il semble qu'exceptionnellement ces moments peuvent durer jusqu'à 48 heures (épisode 6; tableau 4.4).

Tableau 4.4 Certaines caractéristiques des seiches (dénivellations) importantes du lac Saint-Jean.

EPISODE #	DURÉE ECART >=15CM (h)	DURÉE SEICHE (h)	ÉCART MAX (cm)
1	4	40	15
2	8	88	17
3	4	124	15
4	12	60	16
5	8	80	20
6	48	60	21
7	20	52	20
8	4	42	15
9	12	48	20
10	4	46	15
11	20	44	18
12	4	32	15
13	4	20	16
14	4	52	16
15	4	106	17
16	12	28	20

4.2 Les effets atmosphériques

4.2.1 La pression

Nous savons qu'une différence spatiale de pression atmosphérique de l'ordre de 1 kPa (10 millibars) sur un plan d'eau entraîne la formation d'une dénivellation d'environ 10 cm. Cet effet a été remarqué sur des grands lacs, tel le lac Erié (longueur 400 km). Mais, le lac Saint-Jean est-il assez grand pour y être soumis (longueur 45 km)? En procédant à une étude d'échelle, il semble que l'effet est à toute fin pratique imperceptible.

La démonstration s'établit comme suit. Dans sa partie la plus longue, le lac a une dimension d'environ 45 km. Pour obtenir une dénivellation significative de 10 cm par exemple, cela laisse entendre un gradient de pression atmosphérique de 1 kP par 40 km. Or, à l'échelle synoptique, de tels gradients atmosphériques sont rares au Québec.

Les forts gradients observés aux latitudes moyennes sont généralement de l'ordre de 0.2 kPa par 40 km, soit 1 kPa par 200 km, ce qui pourrait permettre au mieux un déplacement de 2 cm. En raison de l'inévitable existence des vents importants à ces moments-là, qui, nous le verrons, agissent grandement sur la surface de l'eau, nous concluons qu'un si faible déplacement ne peut être réellement perceptible.

4.2.2 Les vents

L'examen des données sur les vents de Roberval mises en relation avec les écarts de niveau d'eau entre les stations est fort

révélateur et permet certains constats intéressants. Le constat qui nous semble de première importance est que les vents doivent atteindre une certaine vitesse pour que s'amorce une dénivellation significative. La vitesse requise est apparemment autour de 15 km/h. Sous ce seuil les vents n'ont pratiquement pas d'effet (figures 4.9 à 4.14).

Au-dessus du seuil de 15 km/h, la hauteur de dénivellation semble être proportionnelle à la vitesse. En effet, les moments où les écarts de niveau d'eau dépassent 15 cm sont très souvent associés à des vitesses supérieures à 30 km/h, et les plus grands écarts s'observent surtout quand les vitesses atteignent les 40 km/h.

Cependant, comme on peut le constater pour les épisodes de décembre 1982 (figure 4.10) et octobre et novembre 1985 (figure 4.13), des vents de grande vitesse ne se traduisent pas toujours par la formation de seiches (dénivellations) importantes. Nous constatons également à l'épisode de mai 1983 (figure 4.11), que des vents entre 15 et 25 km/h peuvent aussi donner lieu à la formation de seiches très importantes. Ceci nous amène à considérer le rôle de la direction des vents.

Un examen attentif de tous les épisodes permet de constater et, par le fait même, de confirmer ce qui a été observé ailleurs, à savoir que la direction des vents fixe l'orientation de la formation du phénomène. Globalement, les vents d'ouest donnent des niveaux d'eau plus importants aux stations de Saint-Gédéon et de Saint-Henri, alors que les vents d'est donnent des niveaux d'eau plus importants à la station de Roberval. Dans le détail on note que les écarts de niveau d'eau entre deux stations prennent des valeurs plus importantes pour des directions de vent qui sont pratiquement parallèles à l'axe passant par les deux stations considérées. De fait, en considération des trois points de mesure, les vents d'ouest-nord-ouest à nord-ouest traduisent des niveaux

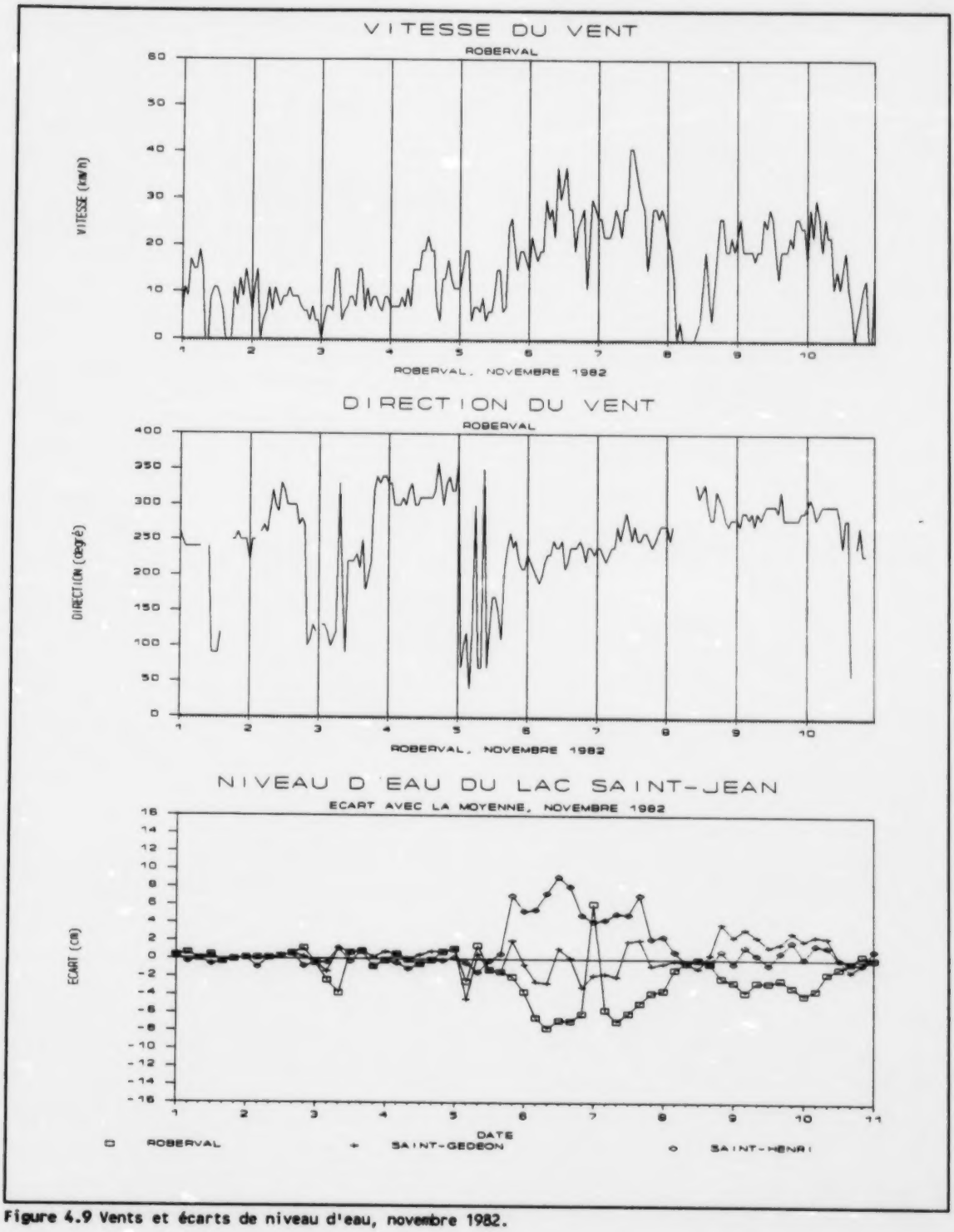

Figure 4.9 Vents et écarts de niveau d'eau, novembre 1982.

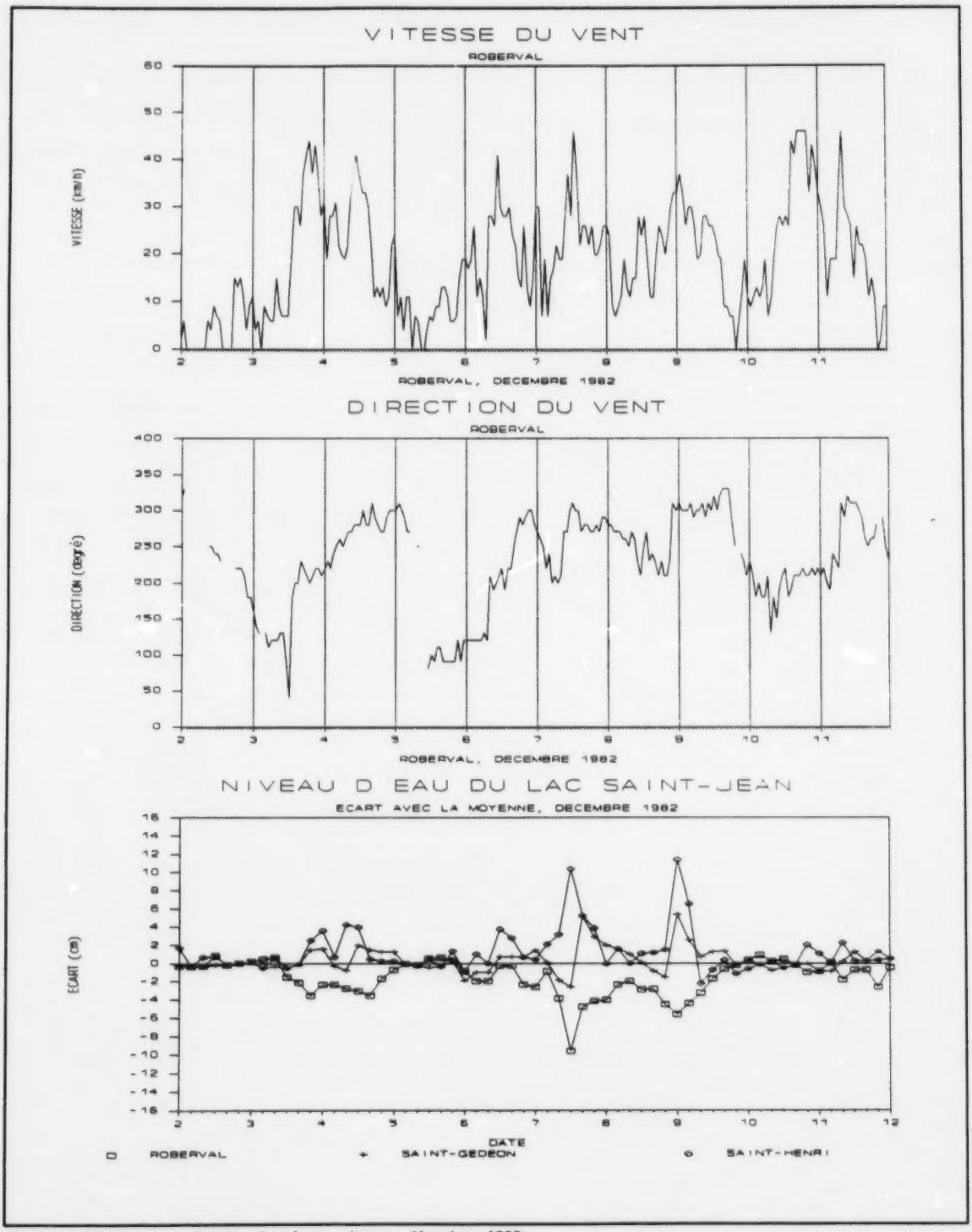

Figure 4.10 Vents et écarts de niveau d'eau, décembre 1982.

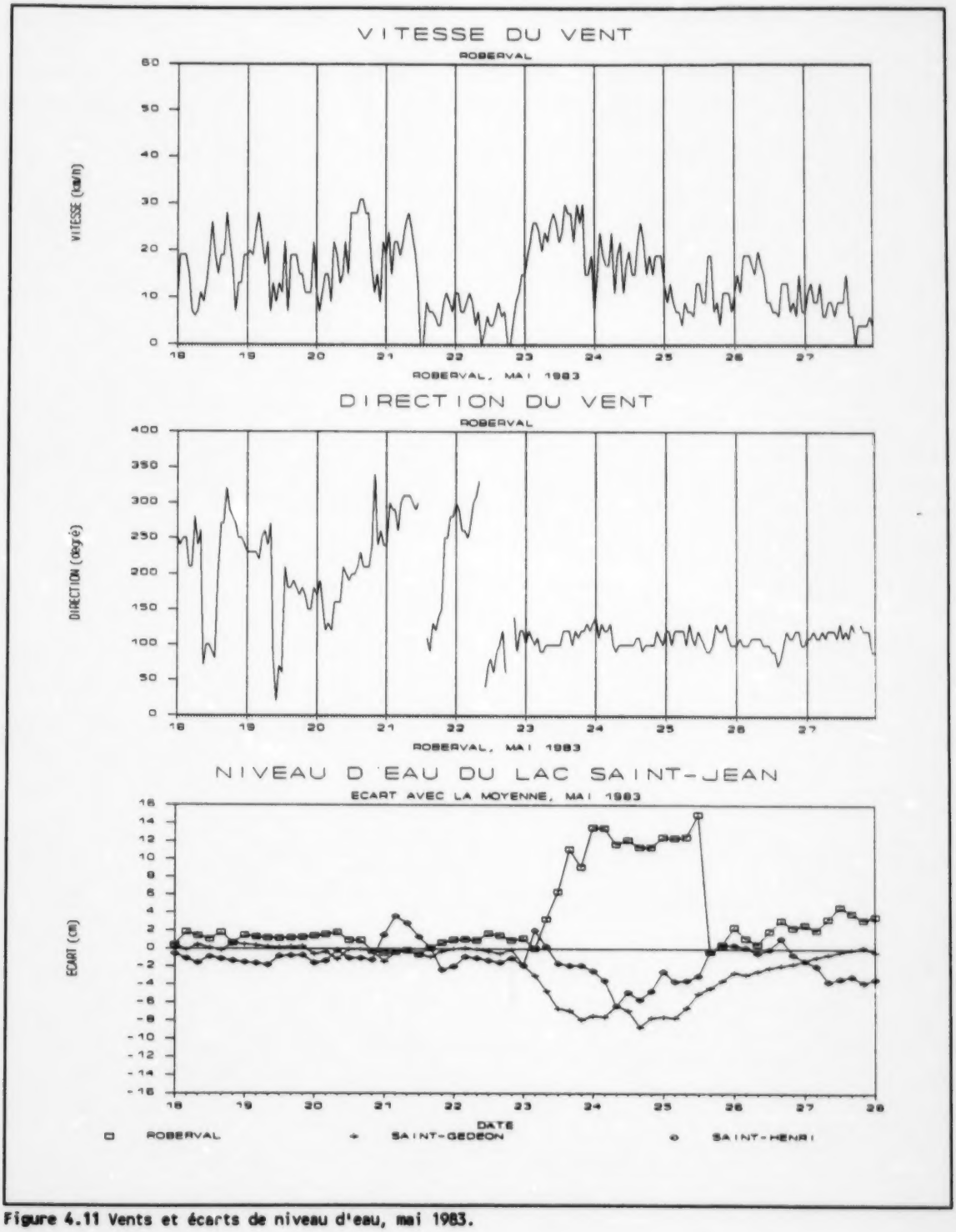

Figure 4.11 Vents et écarts de niveau d'eau, mai 1983.

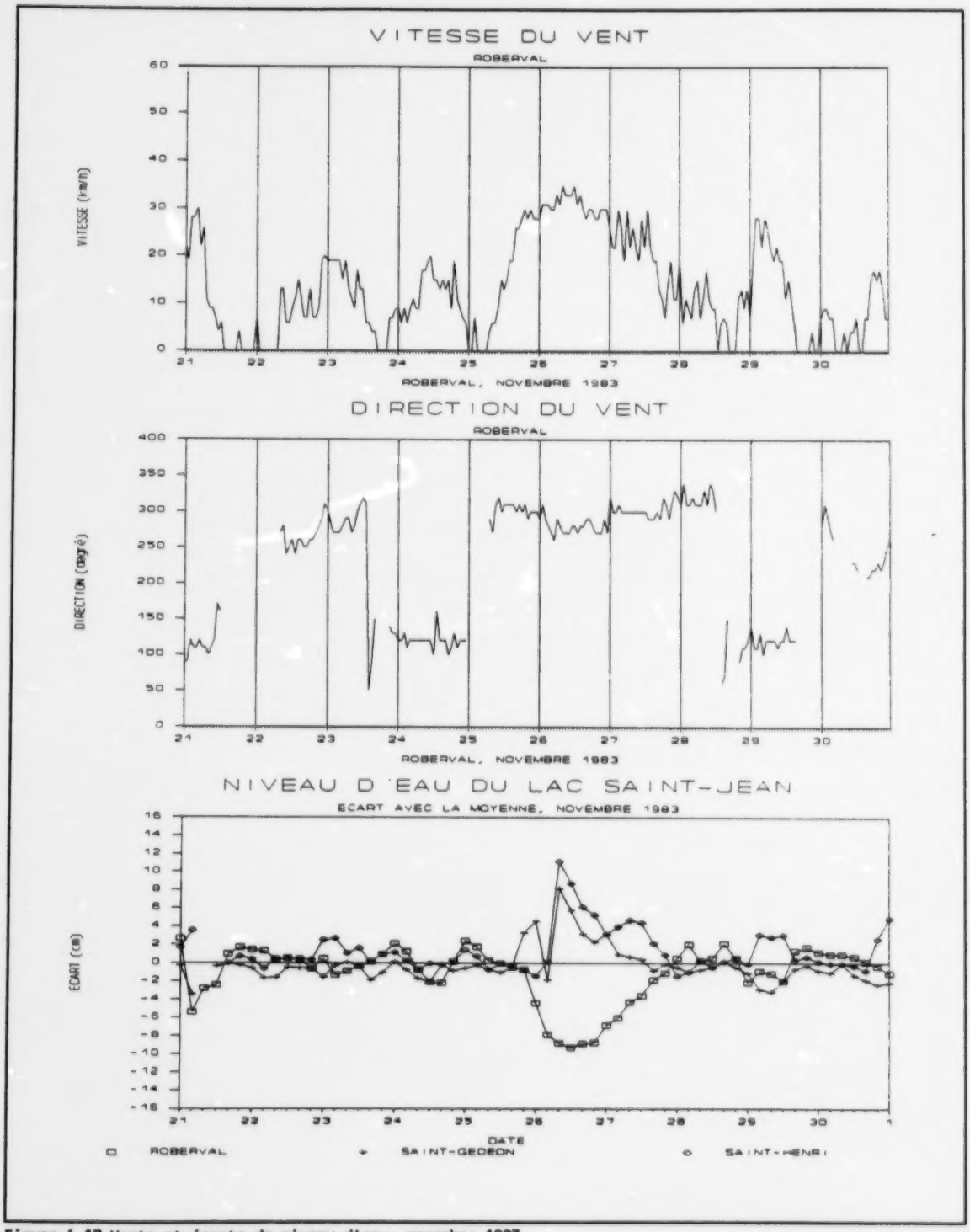

Figure 4.12 Vents et écarts de niveau d'eau, novembre 1983.

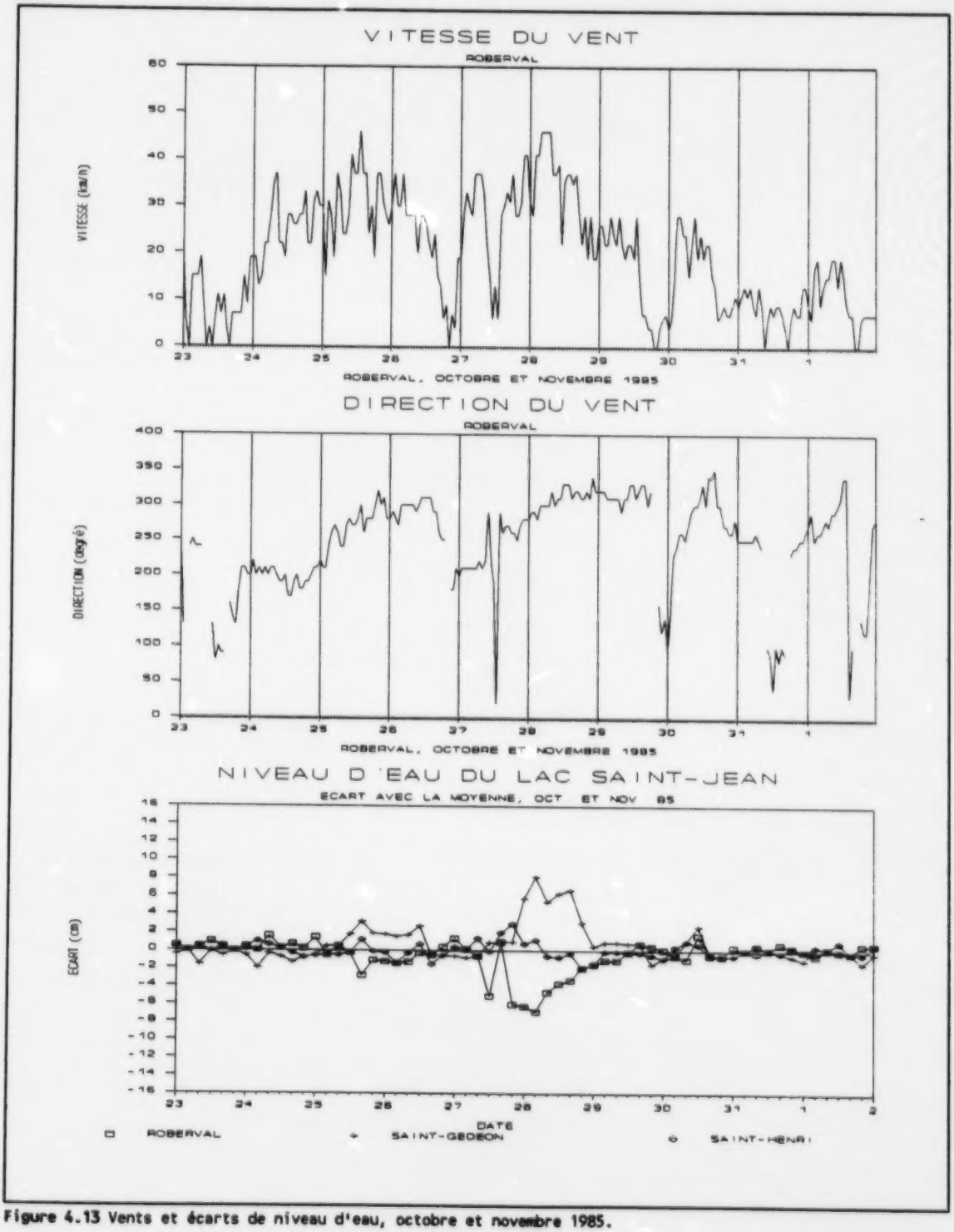

Figure 4.13 Vents et écarts de niveau d'eau, octobre et novembre 1985.

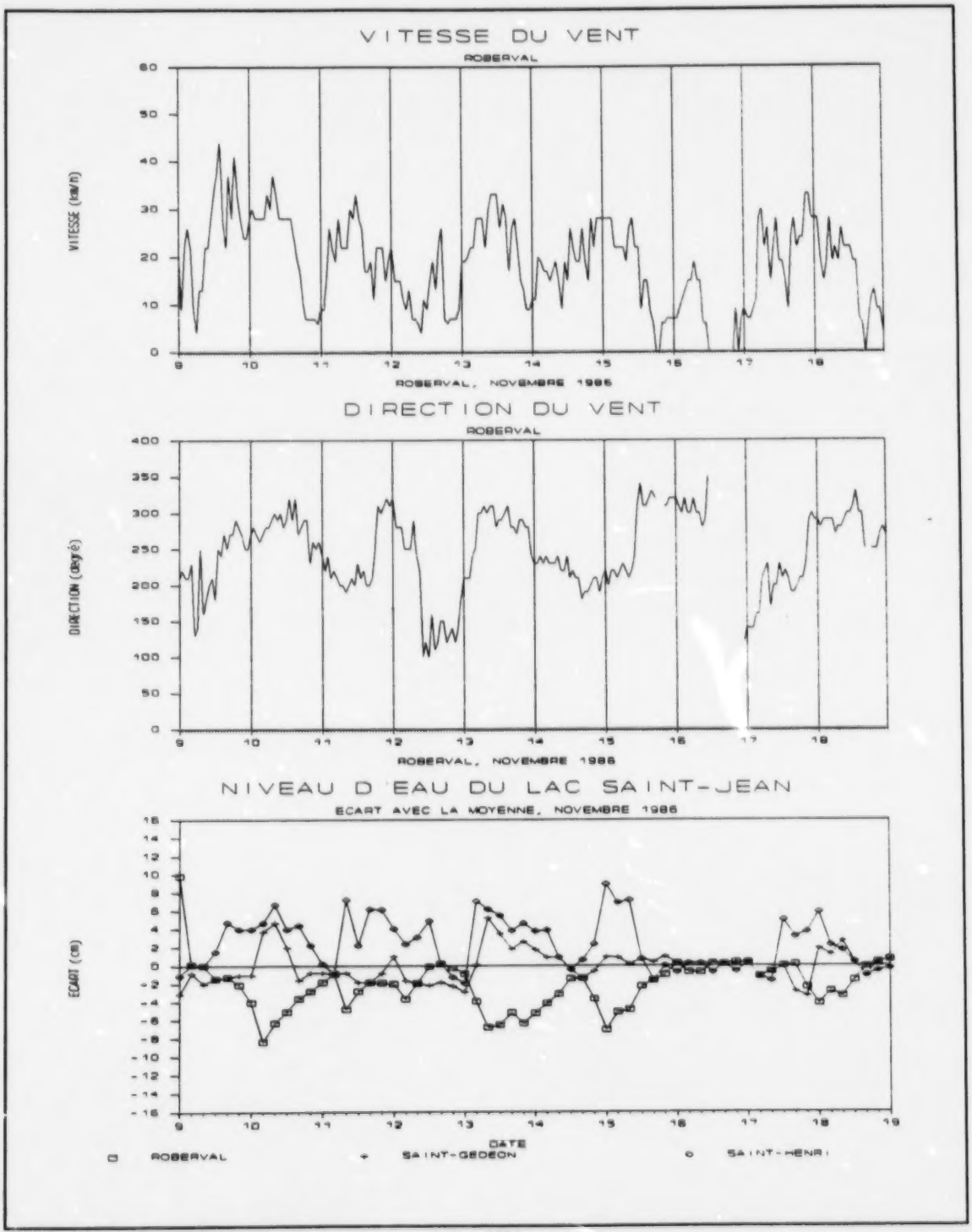

Figure 4.14 Vents et écarts de niveau d'eau, novembre 1986.

plus importants à Saint-Gédéon (figure 4.13). Les niveaux deviennent plus importants à Saint-Henri quand les vents proviennent du sud-sud-ouest à sud-ouest (figure 4.9). Et finalement, les niveaux sont plus importants à Roberval quand les vents arrivent de l'est à est-sud-est (figure 4.11).

Partant de ces constatations, nous nous sommes interrogés sur ce qui se passe quand les vents ont des directions différentes de celles mentionnées auparavant. Certaines observations révèlent l'existence de la formation d'une dénivellation — un début de seiche — dans l'axe d'orientation géographique sud-est nord-ouest. En d'autres termes, des vents du nord-ouest entraînent l'accumulation d'eau sur la partie sud-est du lac. A l'opposé, les vents du sud-est donnent lieu à une accumulation sur la partie nord-ouest du lac. De fait, au cours des journées du 3 et 5 novembre 1982 (figure 4.9) ainsi que du 24 novembre 1983 (figure 4.12), les trois stations hydrométriques ont enregistré une baisse momentanée du niveau d'eau de l'ordre de 2 à 4 cm. A ces moments les vents originaient de l'est sud-est. Par ailleurs, au cours de la journée du 30 octobre 1985, les trois stations ont mesuré une hausse momentanée générale de l'ordre de 2 cm (figure 4.13). A ce moment-là les vents provenaient du nord-nord-ouest.

Ceci nous a conduit à nous questionner sur un autre aspect, celui de la représentativité de notre moyenne mobile calculée à partir des trois stations pour une période de 16 heures. Cette réflexion nous a fait découvrir que le comportement de notre moyenne reflète le balancement du lac dans l'axe sud-est nord-ouest. De ce fait, nous nous sommes rendus compte que notre moyenne, et probablement toute autre moyenne établie à partir des trois stations hydrométriques actuelles, est une représentation inexacte du niveau moyen du lac Saint-Jean. Bon nombre d'épisodes ont permis cette constatation, soit : novembre 1983; octobre et novembre 1984; octobre et

novembre 1985; avril et mai 1987. Cependant, celui de novembre 1986 est en soi plus démonstratif et convaincant (figure 4.7).

L'épisode du 9 au 19 novembre 1986 a ceci de particulier; le comportement de la moyenne montre une oscillation quasi régulière d'une amplitude de 1 à 2 cm et d'une période de 36 à 40 heures (figure 4.7). De plus, du 9 au 14 on note une tendance à la hausse du niveau d'eau. Une hausse qui ne s'explique pas par une modification des débits d'entrée et de sortie. Le 14, il y a une rupture du mouvement haussier accompagnée d'une baisse de niveau d'eau de quelque 3 à 4 cm; une baisse qui n'est pas justifiée car le débit à la sortie du lac Saint-Jean est demeuré stable tout au long de cette période. Ensuite, jusqu'au 19, il n'y a plus de tendance apparente. Durant cet épisode, des vents de plus de 15 km/h se sont manifestés à plusieurs reprises. Ceux-ci ont à cinq reprises donné lieu à des observations d'écarts de niveau d'eau relativement importants.

La première moitié de l'épisode a été soumise à trois séquences de vents forts relativement longues (à l'échelle d'une journée) qui avaient un schéma de direction similaire (figure 4.14). En effet, durant ces séquences, les vents forts provenaient d'abord du secteur sud et évoluaient graduellement pour finalement provenir du secteur nord-ouest. Ce changement de direction des vents a eu pour conséquence d'empiler dans un premier temps l'eau sur la rive nord-est du lac pour ensuite déplacer cet empilement vers la rive sud-est. Résultat, le niveau du plan d'eau monte au sud-est et diminue au nord-ouest. Puis, quand les vents deviennent moins forts, le plan d'eau tend à reprendre son horizontalité ce qui donne lieu à un début d'oscillation et donc, à une inversion de la dénivellation du plan d'eau. Les trois poussées séquentielles des vents forts se sont apparemment produites en harmonie avec l'oscillation, de telle sorte que le balancement de la masse d'eau fut de plus en plus grand, d'où cette tendance à la hausse du

niveau d'eau (voir le comportement de notre moyenne sur la figure 4.7 de l'épisode de novembre 1986).

Le balancement de la masse d'eau induit par les vents de la première moitié de l'épisode s'estompa rapidement sous l'influence de forts vents persistants du secteur sud-ouest survenus le 14 et le 15 novembre 1986. A ce moment-là, l'enregistrement des stations identifie une baisse notable du niveau d'eau. Étant donné que cette baisse subite ne trouve pas d'explication dans le comportement des débits (la venue et la sortie d'eau au lac demeuraient assez stables), il semble que nous avons là un bel exemple d'une fausse représentation de la réalité. On a l'impression que le niveau d'eau moyen a baissé alors que dans les faits il est probablement demeuré constant. Finalement, le retour de vents semblables à ceux de la première moitié de l'épisode réinstalle le balancement dans l'axe sud-est nord-ouest.

Évidemment, compte tenu de la localisation des stations, notre moyenne représente les mouvements verticaux de la partie sud-est du plan d'eau (figure 2.1, page 6). Ce ne sont toutefois pas les mouvements associés à l'extrémité du phénomène, là où l'on détermine les hauteurs maximales de dénivellation, ceci en raison de la position géographique des stations; notamment celle de Roberval qui est certainement à proximité du lieu où doit se situer soit la ligne nodale ou soit le noeud.

En raison de l'inconstance de la vitesse et de la direction et, aussi, du fait que les données hydrométriques sont disponibles aux quatre heures, il est difficile d'établir le temps requis au vent pour créer un début de seiche. Néanmoins, il semble que le temps de réponse est assez court; du moins il est inférieur à l'intervalle d'échantillonnage des données hydrométriques. Le critère de base est, selon nous, la vitesse. Nous l'avons mentionné auparavant, le vent doit apparemment atteindre le seuil de 15 km/h. Dès

que le seuil est franchi, la surface réagit en moins de quatre heures. Nous devons toutefois nuancer cette notion de seuil.

En effet, tout au long de l'étude nous avons utilisé les données des vents de Roberval. A priori, nous avions admis inconditionnellement ces vents représentatifs de ce qui se passe sur le lac et ce, parce qu'ils sont la seule source d'information couvrant la période concernée par l'étude. Mais, un examen du comportement des vents aux stations de Saint-Gédéon et de Saint-Henri, mesurés depuis juin 1985 et novembre 1986, respectivement, permet de constater qu'il peut en être tout autrement (figures 4.15 à 4.17). Les différences de vitesse sont à l'occasion notables. Elles peuvent être jusqu'à 2,5 fois plus importantes à l'est du lac. Les directions diffèrent aussi à certains moments. A l'est du lac, les directions sont quelques fois perpendiculaires à celles de Roberval, comme ce fut le cas notamment les 26 et 28 octobre 1985 (figure 4.15), les 15 et 16 novembre 1986 (figure 4.16). Ces différences ont assurément un impact sur le comportement de la masse d'eau. Si les vents ont sur différentes parties du lac des directions et vitesses non uniformes, il en résulte une animation de la surface difficile à prévoir à partir d'un seul point d'observation. Le seuil de vitesse établi à partir de la station de Roberval doit donc être utilisé avec un certain recul, en considération de ce qui se passe ailleurs sur le lac. Il en est de même pour la considération des directions de vent qui déterminent les régions du lac qui seront soumises aux hausses de niveaux d'eau.

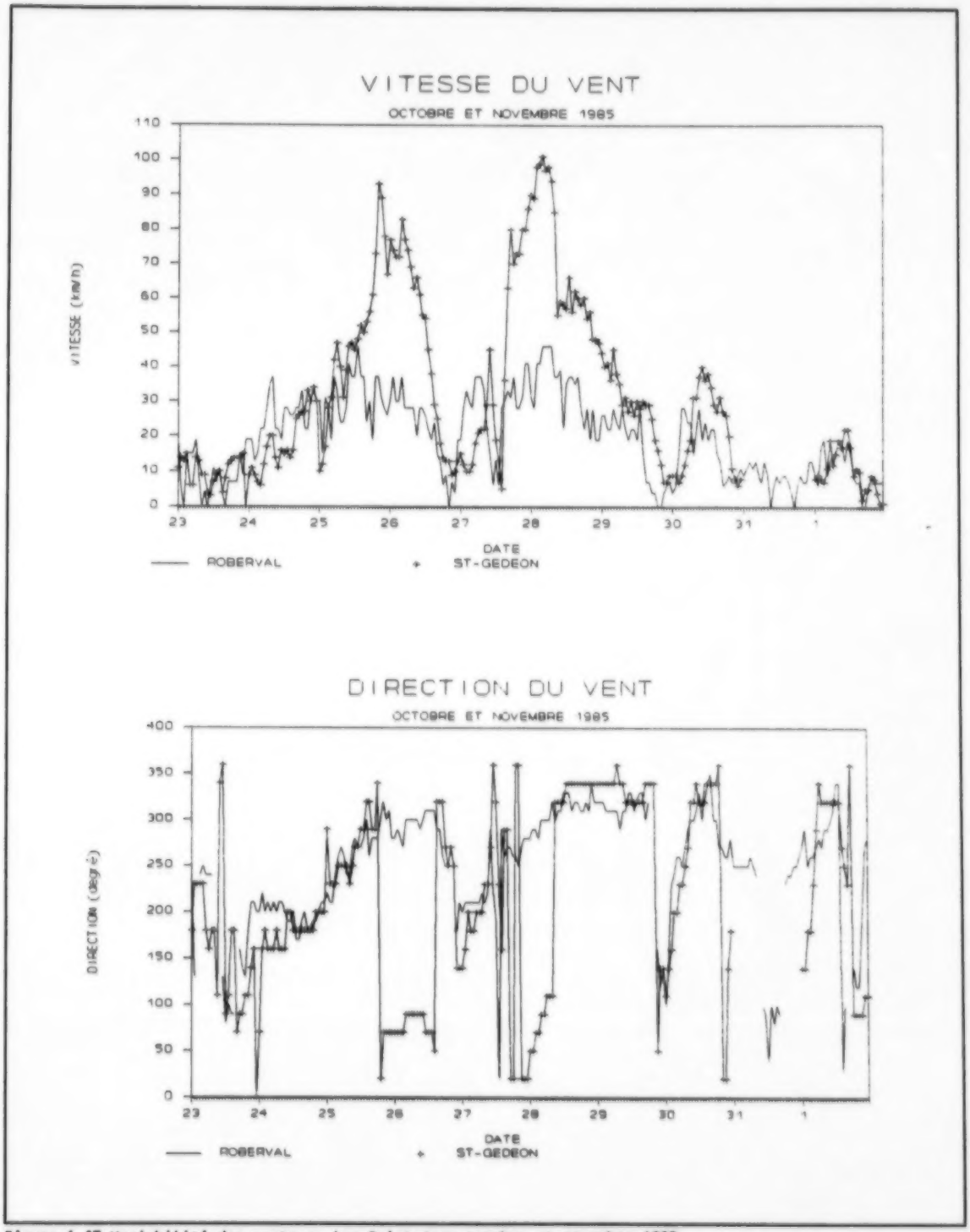

Figure 4.15 Variabilité des vents au lac Saint-Jean octobre et novembre 1985

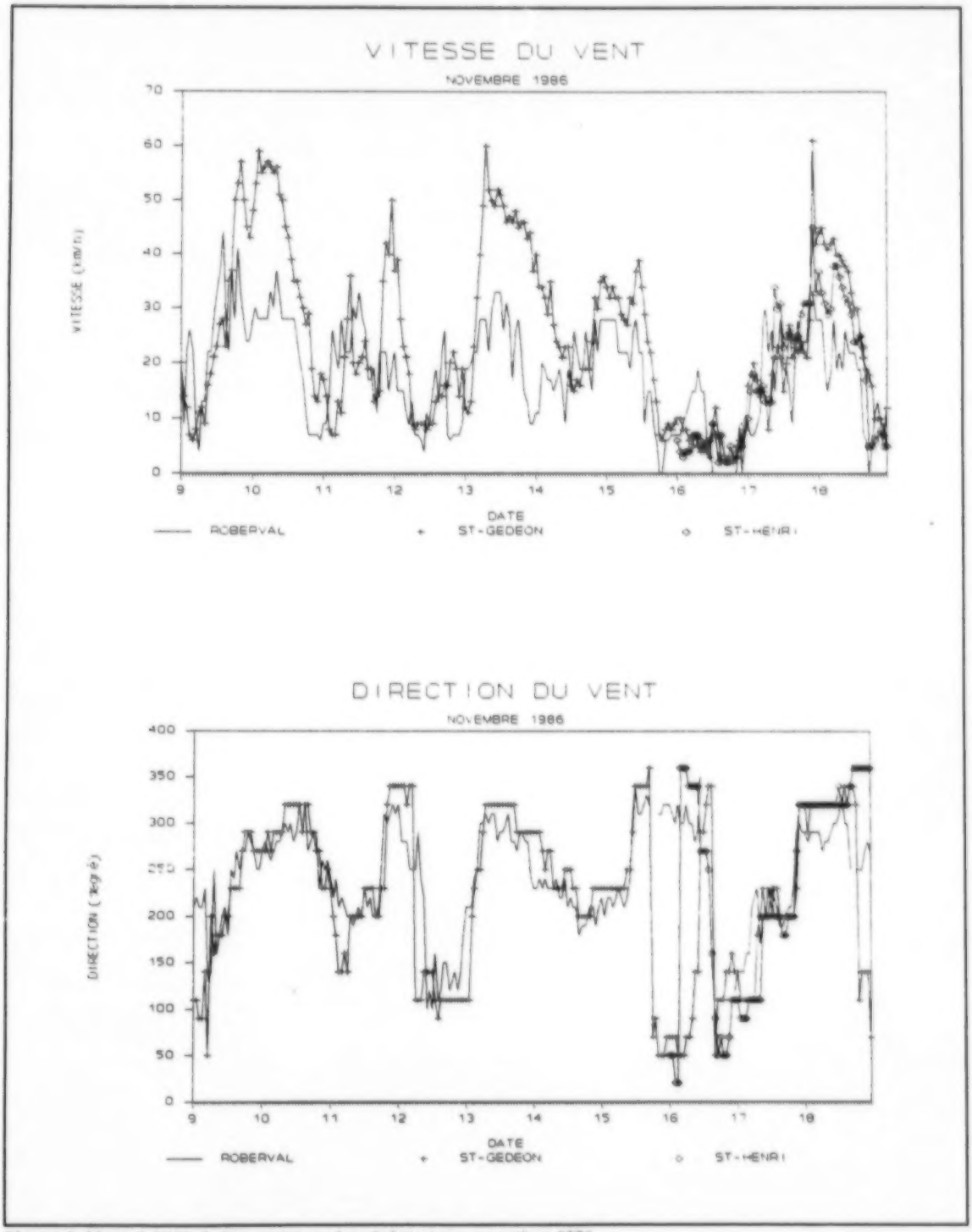

Figure 4.16 Variabilité des vents au lac Saint-Jean, novembre 1986

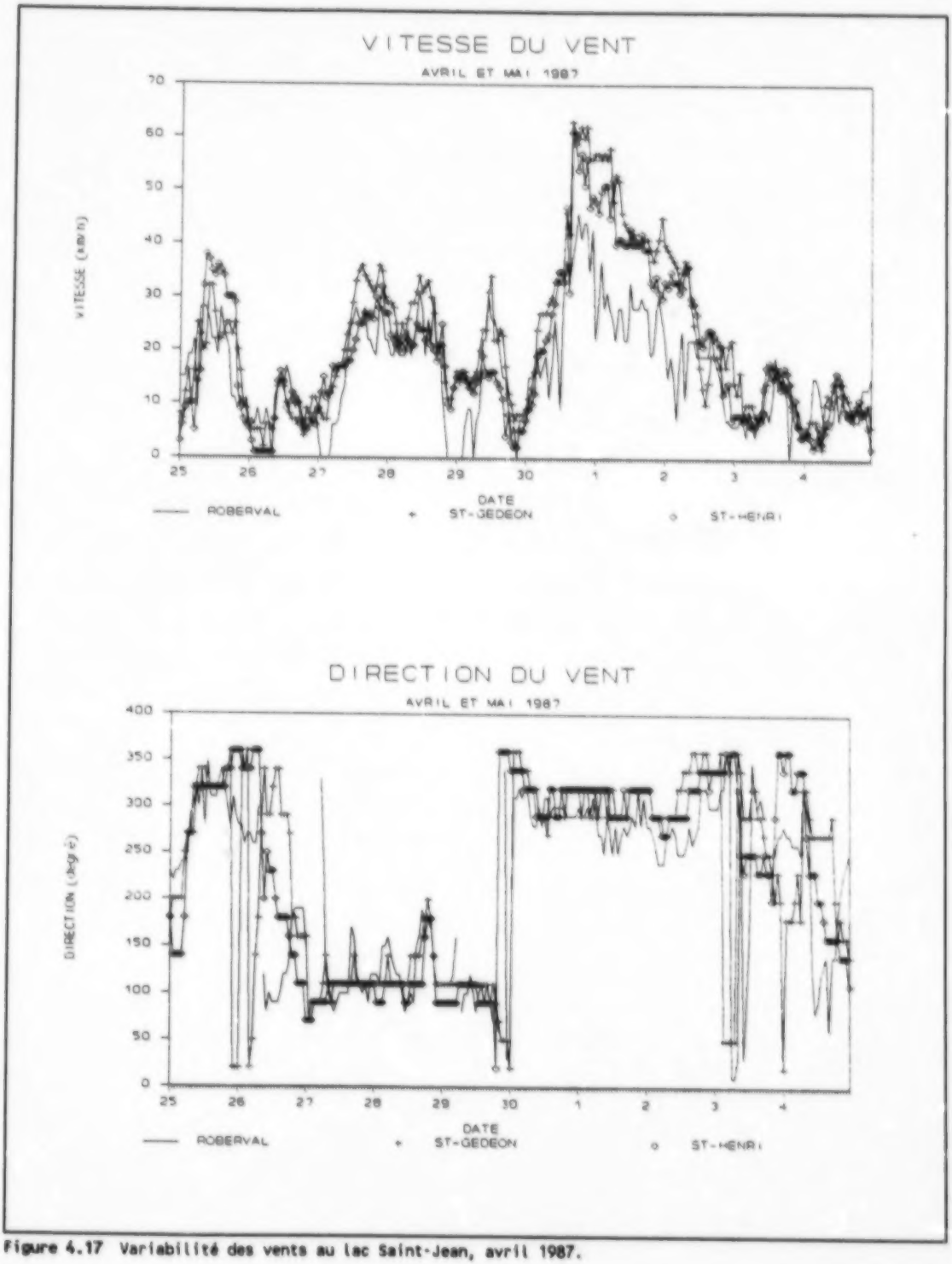

Figure 4.17 Variabilité des vents au lac Saint-Jean, avril 1987.

5. CONCLUSION

L'étude montre que le lac Saint-Jean est occasionnellement animé par d'importants et lents mouvements d'élévation et de baisse concomitants qui donnent des dénivellations pouvant atteindre 21 cm dans l'axe est ouest, d'une rive à l'autre. De plus, malgré l'impossibilité d'établir une mesure directe, à cause de la position géographique des stations hydrométriques, l'analyse de certaines données laisse présumer l'existence de dénivellations peut être plus importantes encore dans l'axe sud-est nord-ouest.

Selon l'information utilisée, depuis 1981, il se produit environ deux dénivellations supérieures ou égales à 15 cm par année. Celles-ci s'observent quelques fois au printemps mais principalement à la fin de l'été et à l'automne, et durent généralement moins d'une journée.

Ces dénivellations sont produites par des vents forts et persistants qui exercent une contrainte de cisaillement à la surface et qui contraignent la masse d'eau à s'empiler sur les rives au vent. La direction des vents joue un rôle capital dans cette dynamique puisqu'elle détermine l'orientation de la dénivellation du plan d'eau. La vitesse, quant à elle, fixe l'ampleur de l'événement, soit les hauteurs de dénivellation.

De fait, la vitesse est le premier élément à considérer puisqu'elle est le moteur de la formation d'une dénivellation. En se basant sur les données de la station de Roberval, le seuil de vitesse requis pour initier ce phénomène semble être situé autour de 15 km/h. Le temps nécessaire à un vent de telle vitesse pour que se produise un début de seiche (une dénivellation) est inférieur à quatre heures.

Ces dénivellations forcées par le vent ("wind set-up") constituent le processus de formation d'un phénomène oscillatoire désigné par le terme **"seiche"**. Aux épisodes où les dénivellations sont supérieures ou égales à 15 cm, ce processus de formation s'échelonne généralement sur plus d'une journée et montre une évolution saccadée (en dents de scie). Il nous fut impossible d'évaluer l'activité des seiches puisque, pour un lac de dimensions semblables à celles du lac Saint-Jean, la période d'oscillation des seiches est de une à deux heures. Ainsi, et bien que nous utilisions le terme "seiche" dans la présentation des résultats, notre étude a examiné une portion de l'événement, celle liée à la naissance.

Partant de nos résultats, et considérant que la ligne nodale est en principe perpendiculaire à la direction des vents et à mi-chemin sur l'axe d'oscillation, il nous fut possible de définir des aires hypothétiques de localisation de la ligne nodale, et ce, pour certaines directions de vent significatives (figure 5.1). Si cette hypothèse était confirmée, nous aurions là un instrument de travail très intéressant pour bien saisir la variation du niveau d'eau du lac Saint-Jean. En effet, en exploitant une notion de proximité à la ligne nodale ("equilibrium axis method", UNESCO, 1981), les gestionnaires pourraient sélectionner la ou les stations pertinentes à l'évaluation du niveau d'eau moyen et de l'ampleur du phénomène. A titre d'exemple, pour des vents du nord ou du sud, les mesures de la station hydrométrique de Roberval seraient représentatives du niveau d'eau moyen (voir aire des lignes nodales pour des vents nord/sud sur la figure 5.1), et la différence de niveau d'eau entre Saint-Henri et Roberval serait représentative de l'amplitude (demi-hauteur de seiche) de la dénivellation.

Cette définition des aires hypothétiques de localisation de la ligne nodale nous a conduit à une autre hypothèse. Sachant en effet que les vents forts dominants de la période estivale proviennent

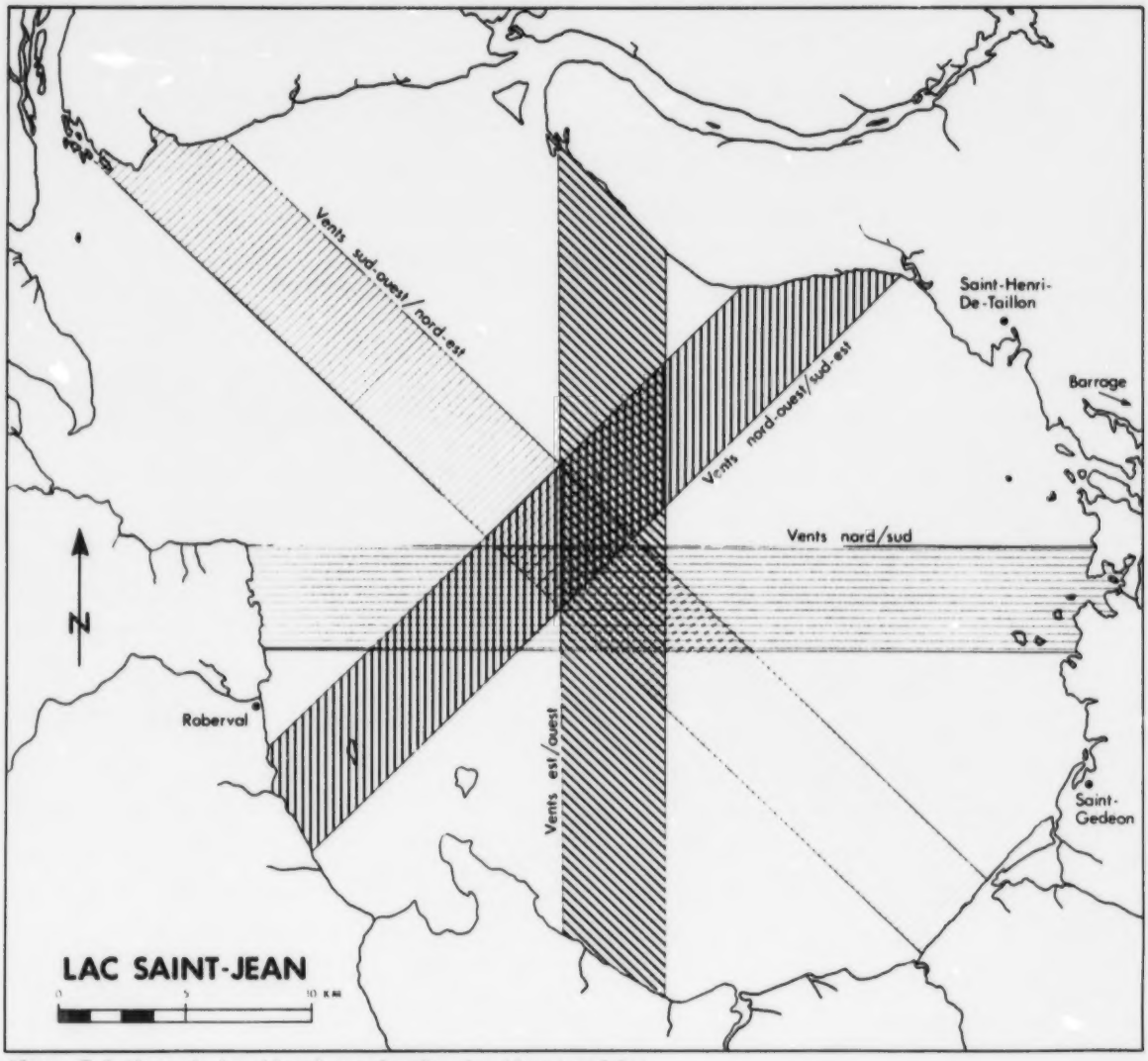

Figure 5.1 Aires de localisation présumées des lignes nodales.

du sud-ouest à nord-ouest (figure 5.2), nous émettons l'hypothèse que les hauts niveaux d'eau doivent être plus fréquents sur la partie est du lac. Si tel est le cas, et considérant la position des stations hydrométriques et la forme du lac (figure 3.1, p. 15), le niveau d'eau moyen établi à l'aide des données des trois stations est surestimé à plusieurs moments durant la période estivale.

Ces considérations hypothétiques et certaines de nos observations laissent donc entendre que la localisation des instruments de

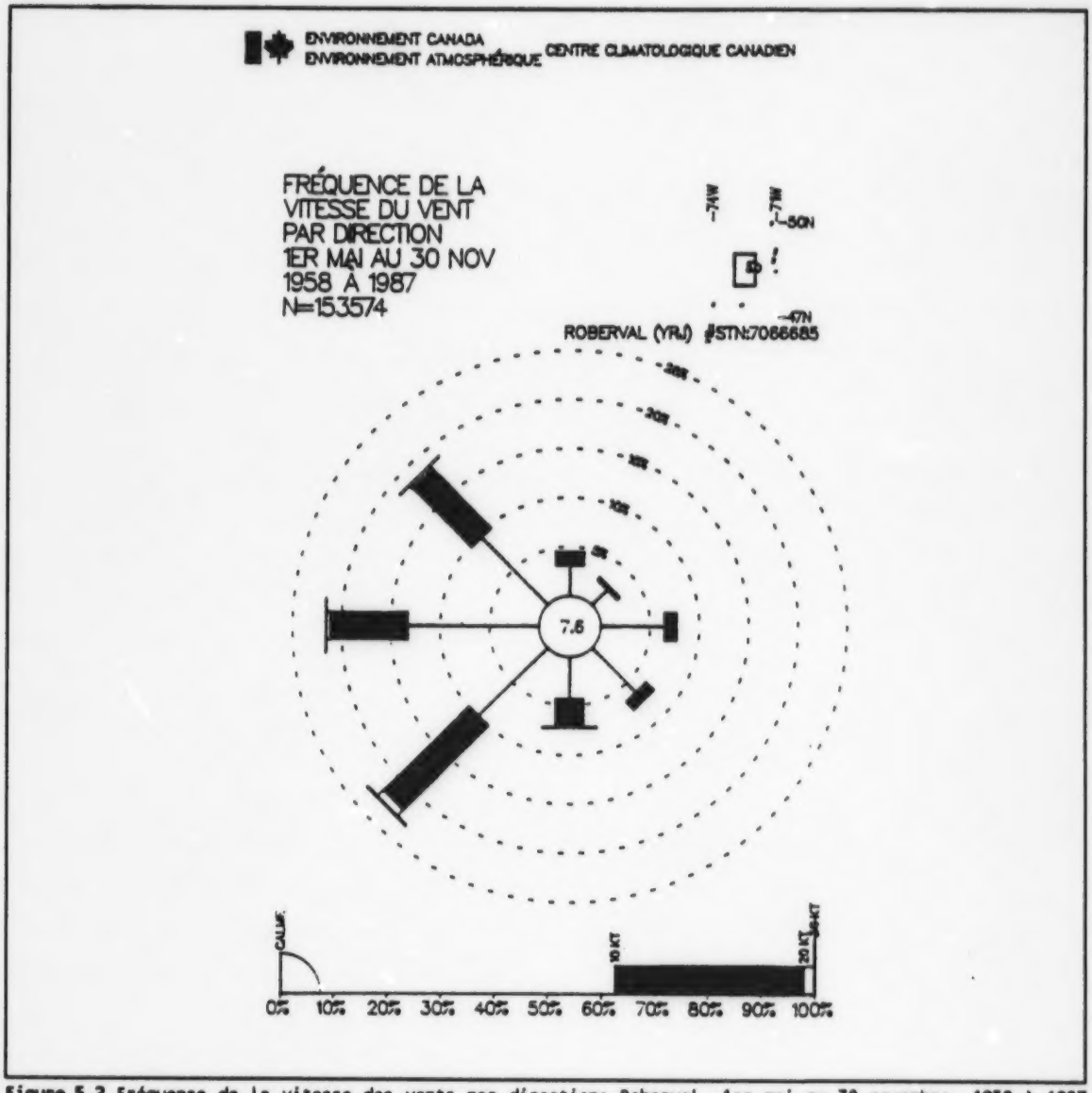

Figure 5.2 Fréquence de la vitesse des vents par direction; Roberval, 1er mai au 30 novembre, 1958 à 1987 (source: Environnement Canada).

mesure ne permet pas toujours de traduire le comportement réel de la surface du lac (hauteur ou amplitude de seiche, niveau moyen). De plus, le patron des vents (vitesse et direction) au-dessus du lac Saint-Jean est, à certains moments, non homogène. D'une rive à l'autre, les vents peuvent dévier jusqu'à 90 degrés de leur trajectoire, et la vitesse peut occasionnellement être 2,5 fois

plus importante. De ces faits, notre démarche d'étude reposant sur les seules données de vent de la station météorologique aéroportuaire de Roberval et des trois stations hydrométriques de Roberval, Saint-Gédéon et Saint-Henri peut comporter certains biais.

Par ailleurs, il est certain maintenant que l'étude détaillée des seiches du lac Saint-Jean doit se réaliser à l'aide de données de niveaux d'eau mesurées sur un intervalle de temps d'échantillonnage inférieur à quatre heures.

6. RECOMMANDATIONS

En vu d'une amélioration de la connaissance du comportement du niveau d'eau du lac Saint-Jean, nous faisons les recommandations suivantes:

i) Ajouter des points d'échantillonnage (stations) au pourtour du lac afin de considérer d'autres axes d'oscillations que ceux considérés par les trois stations existantes. Au minimum, une station devrait être ajoutée dans le secteur au nord-ouest afin d'évaluer les dénivellations dans l'axe sud-est nord-ouest.

ii) Établir une procédure d'échantillonnage (mesure du niveau d'eau) au 15 ou 30 minutes afin de capter les oscillations du lac.

iii) Développer une méthode objective (mécanisée ou non) pour la validation des niveaux d'eau mesurés; une méthode qui doit considérer et mettre en relation les visites d'entretien des stations hydrométriques, le comportement des niveaux d'eau et l'état des vents (vitesse, direction et persistance).

iv) Tenter de simuler les dénivellations à l'aide de modèles numériques existants, et évaluer leur performance; ceci afin d'établir une procédure de gestion qui serait basée sur des prévisions. La simulation devrait considérer: la bathymétrie, les débits d'entrée et de sortie d'eau au lac, et la variabilité des vents sur le lac.

RÉFÉRENCES

ASSOCIATION QUÉBÉCOISE DES TECHNIQUES DE L'EAU (AQTE) et OFFICE DE LA LANGUE FRANÇAISE (OLF) (1981). Dictionnaire de l'eau. Editeur officiel du Québec. 544 p.

BERRY, B.J.L. et F.E. HORTON (1974). Urban environmental management: planning for pollution control. Prentice-Hall, Inc. 425 p.

BRUCE, J.P. et R.H. CLARK (1966). Introduction to Hydrometeorology. Pergamon Press. 319 p.

CENTRE DE RECHERCHES SUR L'EAU (CENTREAU) (1983). Étude préliminaire sur la problématique de la limnimétrie des grands réservoirs. Université Laval, rapport N° CRE-83/07: 143 p.

FORRESTER, W.D. (1983). Canadian tidal manual. Pêches et Océans, Canada (contrat:FP802-1-2147).

HELLSTRÖM, B. (1941). Wind effect on lakes and rivers. Ingen Vetensk Acad. Handl.:158-191.

HUTCHINSON, G.E. (1975). A treatise on limnology (2e éd. rev.). John Willey & Sons. 753 p. (avec les annexes).

LINSLEY, R.K.Jr., M.A. KOHLER et J.L.H. PAULHUS (1982). Hydrology for engineers (3e éd. rév.). McGraw-Hill Book Co. 508 p.

MORTIMER, C.H. (1974). Lake hydrodynamics, Mitt. Int. Ver. Limnol., 20:124-197.

MORTIMER, C.H. (1979). Strategies for coupling data collection and analysis with dynamic modelling of lake motions, in W.H. GRAF ET C.H. MORTIMER (Ed.): Hydrodynamics of lakes (p. 183-222). Elsevier Scientific Publishing Co.

MURTY, T.S. (1984). Storm surges: meteorological ocean tides. Can. Bull. Fish. Aquat. Sci. 212 : 897 p.

TISON, L.J. et G. TISON Jr. (1969). Seiches et dénivellations causées par le vent dans les lacs, baies, mers, estuaires. Note technique N° 102. Organisation météorologique mondiale. Rapport OMM-246.TP.134: 59 p.

UNESCO (1981). Methods of computation of the water balance of large lakes and reservoirs. Volume 1: Methodology. Édité par H.L. Ferguson et V.A. Znamensky: 120 p. Paris.

WELLS, N. (1986). The atmosphere and ocean: a physical introduction. Taylor and Francis, Londre. 347 p.